

2020-2021
ENTREGABLE



Proyecto "COLEARNING"

**DESARROLLO DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE DE TAREAS PARA COBOTS
BASADAS EN INTERACCIÓN HUMANA Y ALGORITMOS DE APRENDIZAJE DE
REFUERZO**

Resumen de resultados

Número de proyecto: 22000052
Expediente: IMDEEA/2020/22
Duración: Del 01/04/2020 al 31/07/2021
Coordinado en AIDIMME por: SÁNCHEZ ASINS, JOSÉ LUIS
Línea de I+D: **INDUSTRIA 4.0**

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Contenido

1	DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	3
2	CARACTERIZACIÓN DE SOLUCIONES	4
2.1	Soluciones industriales.....	4
2.2	Aprendizaje por demostración	4
2.3	Aprendizaje por refuerzo	6
2.4	CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER.....	8
2.5	DISEÑO CONCEPTUAL DE LAS SOLUCIONES.....	12
2.5.1	Aprendizaje por demostración	12
2.5.2	Aprendizaje por refuerzo	14
2.6	REFERENCIAS	16
3	CARACTERIZACIÓN DE SOLUCIONES	17
3.1	MODELO DE APRENDIZAJE POR DEMOSTRACIÓN.....	17
3.1.1	Análisis previo del proceso de lijado	18
3.1.2	Captura de datos del operario. Presión.....	22
3.1.3	Captura de datos del operario. Trayectorias.	25
3.1.4	Pruebas con el sistema de captura de datos	28
3.1.5	Desarrollo del modelo de aprendizaje.....	30
3.2	MODELO DE APRENDIZAJE POR REFUERZO	38
3.2.1	Desarrollo del modelo de aprendizaje por refuerzo	40
3.2.2	Ejecución del lijado de piezas según modelo de aprendizaje.....	44
3.2.3	Resultados del experimento.	48
3.2.4	Conclusiones	50
4	DESARROLLO DE PRUEBAS PILOTO.....	52
4.1	Piloto de aprendizaje por demostración	53
4.2	Piloto de aprendizaje por refuerzo.....	62
4.3	Conclusiones.....	64

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

1 DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.

En términos generales, la programación de robots se ha simplificado mucho en los últimos años. Los fabricantes han desarrollado herramientas gráficas y métodos gestuales que facilitan la generación de programas en cualquier tipo de robot. Obviamente, cada programa es válido en un entorno concreto y para una tarea específica, por lo que se requiere reprogramación si cambia alguna de las dos circunstancias.

Por ello, uno de los retos clave del despliegue de COBOTS (robots colaborativos) en entornos donde la presencia humana es importante, tales como las industrias manufactureras, es la adaptación a tareas que cambian con frecuencia y de forma impredecible. En estas circunstancias, el robot debería poder actualizar rápidamente la forma en que desarrolla su tarea. Es decir debería poder aprender de forma incremental y adaptándose a las circunstancias tanto del entorno como de la tarea.

Más allá de los sistemas de programación que cada fabricante de robots utiliza, los cuales tienden a simplificar y facilitar la programación, se pueden implementar técnicas que aceleran el aprendizaje del robot para realizar nuevas tareas. Y algo que sería más importante en determinados tipos de trabajo: permitirían afrontar tareas que no son exactamente iguales a la aprendida, pudiéndose asumir variaciones que formen parte de la naturaleza cambiante de los productos procesados, adaptando el ciclo de trabajo a las características de cada producto individual.

Por ello, **el objetivo del proyecto** era desarrollar un sistema de aprendizaje para COBOTS que permitiese la reconfiguración del programa de forma autónoma, en función de las variaciones del proceso o producto que no pueden ser consideradas en toda su amplitud en una rutina de programación estándar. Como caso de uso se ha aplicado a un proceso con mucha carga de trabajo manual: el lijado/pulido de piezas de tablero, cuya geometría difiere ligeramente de unas piezas a otras.

En este proyecto se han utilizado y comparado dos técnicas de aprendizaje diferentes para conseguir el objetivo de auto-reconfiguración del ciclo de trabajo: por un lado la supervisión humana, a través de la cual el COBOT puede adquirir nuevas capacidades mediante la demostración de tareas; por otro lado el aprendizaje de refuerzo mediante redes neuronales y el uso de funciones de recompensa, que permitirían mejorar el desempeño de la tarea a partir de los resultados que se van obteniendo.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

2 CARACTERIZACIÓN DE SOLUCIONES

El objetivo de este paquete de trabajo es desarrollar soluciones conceptuales al problema genérico del aprendizaje de robots, previamente caracterizado, mediante las metodologías que se pretende comparar en el proyecto. Estas soluciones servirán de base para desarrollar experimentalmente ambas metodologías.

2.1 SOLUCIONES INDUSTRIALES

Las aplicaciones de acabado automatizadas como el lijado y pulido de piezas, han sido tradicionalmente realizadas mediante robots industriales. Pero cada vez más, están implementándose para realizar estas operaciones robots de tipo colaborativo. El fabricante de automóviles Ford, ha implementado en su línea de producción varios de estos robots para el pulido de uno de sus modelos.

La reciente incorporación de los robots colaborativos a la industria en procesos tan concretos como son el lijado y pulido de piezas, implica que no existan demasiadas referencias al respecto, y que principalmente nos encontremos como referentes de dichos procesos, los sistemas o aplicaciones desarrollados por principales fabricantes de equipamiento para cobots. El fabricante de herramientas para robots, Robotiq, ha desarrollado un kit para la aplicación de lijado que consta tanto de la parte de equipamiento como de la parte software, de tal forma que han creado una aplicación específica para hacer procesos de acabado sin necesidad de programaciones complejas.

También la firma OnRobot, ha presentado una solución de automatización de lijado y pulido. El paquete completo de acabado, incluye tanto el equipamiento como el software necesario para el proceso, además de algunos elementos opcionales como el sensor de fuerza y un cambiador automático de lijas, sin necesidad de que intervenga el operario.

Un factor común en las aplicaciones de lijado mediante robots, ya sean colaborativos o industriales, es el empleo de un collarín de contacto activo, que hace que los robots sean sensibles al tacto de tal forma que la fuerza de contacto se mantiene constante incluso en caso de cambios de orientación durante el proceso.

2.2 APRENDIZAJE POR DEMOSTRACIÓN

Los robots han ido evolucionando con el paso del tiempo, para ser más seguros y sencillos de programar. Esto ha permitido nuevos métodos de programación. Uno de ellos se denomina: “Aprendizaje por demostración” (Learning from Demonstration FfD) o “Programación por demostración” (PbD).

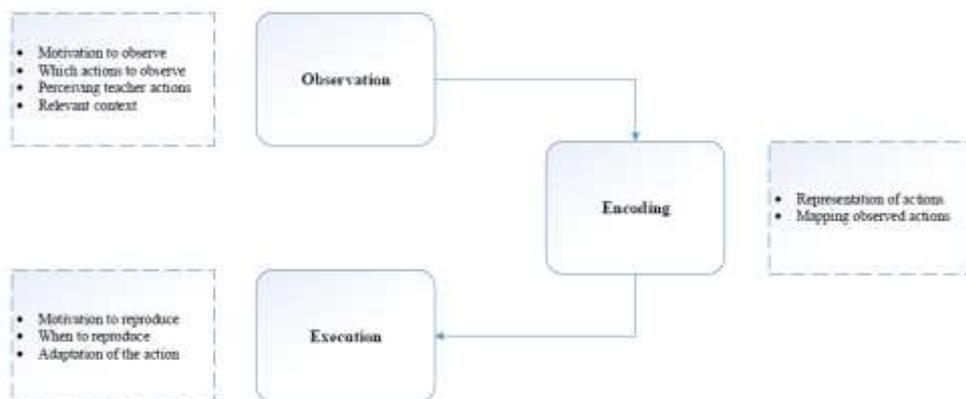
En este tipo de aprendizaje el robot memoriza las acciones que realiza un humano, para ejecutar una determinada tarea. Este proceso se repite un número determinado de veces, para que el robot pueda crear un modelo cinemático. Este modelo es una aproximación a los movimientos generados por el humano.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Ahora estos modelos deben de ser reproducidos por el robot, y para ello debe de convertir los movimientos humanos en movimientos robotizados, con las complejidades que ello tiene, pues no todos los movimientos pueden ser reproducidos por el robot. Este hecho limita la flexibilidad y aplicabilidad de los robots para completar tarea. Por otro lado los robots desconocen los objetivos de la tarea al realizarla, simplemente ejecutan una serie de comandos en orden.

Un enfoque más útil de la imitación es la imitación dirigida a objetivos. En este caso, en cambio de modelar los parámetros cinemáticos de la tarea, se modelan los efectos de la acción. Por ejemplo, la acción es lijar una pieza en función de sus irregularidades. Para ello habrá que enseñar al robot a identificar lo que es una irregularidad, a clasificarla en función de la acción a realizar. Y por último deberá de realizar la acción en el punto concreto donde se encuentre la irregularidad [9]]. De aquí se desprenden las siguientes cuestiones: ¿Qué imitar? ¿Cómo imitar? ¿Cuándo imitar? ¿Cómo el robot evalúa sus acciones?

Para ello habrá que dotar al robot de datos (observación) que le permitan tomar esas decisiones (ejecución), tal y como se puede visualizar en las dos imágenes siguientes.



Propuesta de aprendizaje por demostración (i) Fuente: [11]

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

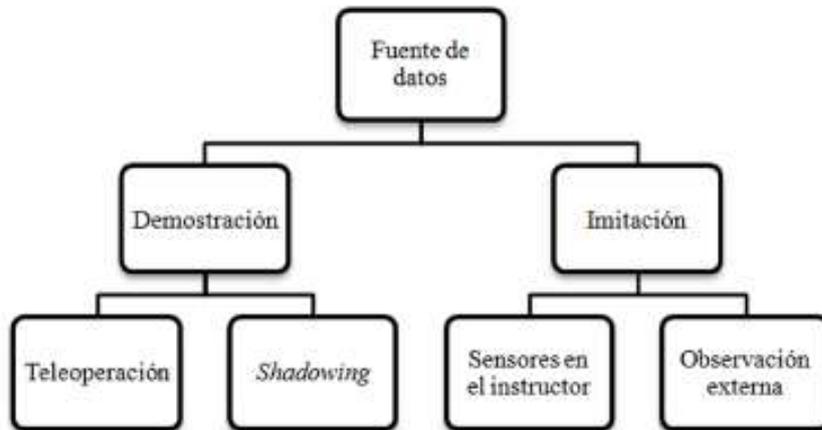


Figura 2.1: Taxonomía de Aprendizaje por Demostración.

Propuesta de aprendizaje por demostración (ii) Fuente: [12]

El aprendizaje del robot a partir de la demostración requiere la adquisición de trayectorias de ejemplo, que pueden ser capturadas de varias formas. Alternativamente, un robot puede ser guiado físicamente a través de la trayectoria por su operador, y la trayectoria aprendida se registra.

2.3 APRENDIZAJE POR REFUERZO

El sistema de aprendizaje en el que se va a basar esta parte del proyecto, es conocido como aprendizaje por refuerzo, más conocido por su nombre inglés (*Reinforcement learning*).

El objetivo del aprendizaje por refuerzo es desarrollar un sistema que sea capaz de aprender de manera autónoma basado en la experiencia que va adquiriendo. Para llegar a resolver este tipo de problema se utiliza el algoritmo de Q-Learning.

El primer paso que se debe llevar a cabo es la definición formal de todos los elementos que van a tomar partido en el experimento:

- S – Conjunto de estados del sistema.
- A – Conjunto de acciones del sistema.
- $P(s' | a, s)$ $a \in A$ $s, s' \in S$ – Transiciones del sistema. Probabilidad de llegar al estado s' dado que se ejecuta la acción a en el estado s .
- α – Distribución del estado inicial.
- γ – Factor de descuento. Importancia relativa que damos a recompensas futuras
- $r(s)$ o $r(s, a)$ – Función de recompensa. Dependiendo del sistema, la función de recompensa dependerá del estado, o bien del estado y de la acción mediante la cual se ha llegado.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Este conjunto de elementos conforman lo que se conoce como un **Proceso de Decisión de Markov**, y es el marco de trabajo sobre el que se establece el aprendizaje por refuerzo.

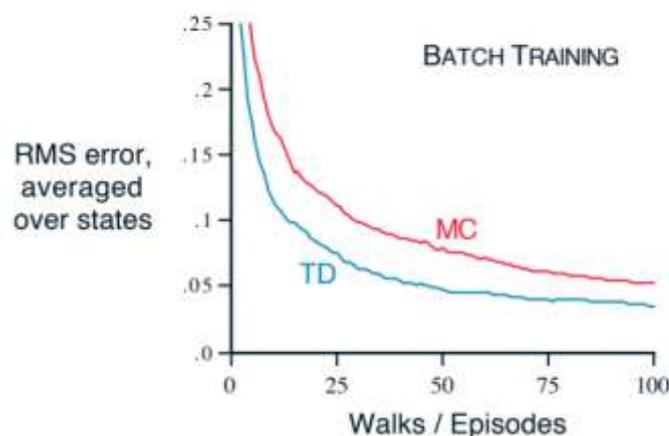
El método más simple para completar esta tarea, es el método de Montecarlo en alguna de sus dos variantes (first-visit, every-visit). El objetivo del método es encontrar la función de valor de una política dada, es decir, ejecutar las acciones propuestas e ir recuperando los datos obtenidos en la ejecución, con los datos obtenidos al terminar la ejecución, se rectifica la política y se prueba otra vez.

Sin embargo, este método tiene varias debilidades, principalmente, requiere de entornos en los que se comience y se acabe (episodios), además, el aprendizaje se realiza una vez terminada la ejecución, por lo que durante la ejecución no es capaz de obtener conocimiento y mejorar.

Para solventar los problemas que presenta el método de Montecarlo podemos utilizar el aprendizaje por diferencia temporal normalmente abreviado como TD. En este caso, la función de valor se va a calcular de manera continua, permitiendo así generar un aprendizaje independientemente de que existan episodios o no.

El aprendizaje por diferencia temporal presenta varias ventajas, entre ellas:

- No requiere el conocimiento del modelo completo, puede ir aprendiendo sobre la marcha.
- Aprendizaje instantáneo, no necesita esperar hasta terminar la ejecución del episodio como Montecarlo.
- Para una política fija, se ha demostrado que converge a la función de valor de la política.
- Normalmente TD converge más rápido que MC tal como se muestra en la imagen siguiente.
-



Comparación de convergencia entre TD y MC [14]

A pesar de la ventaja tan clara marcada por TD sobre MC, este sigue teniendo un problema grave, y es que TD depende de una política π , por eso, ha sido desarrollado

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

el algoritmo Q learning, que es capaz de funcionar sin una política de funcionamiento predefinida. La regla de actualización para este caso es la siguiente:

$$Q(S_t, A_t) \leftarrow Q(S_t, A_t) + \alpha \left[R_{t+1} + \gamma \max_a Q(S_{t+1}, a) - Q(S_t, A_t) \right]$$

Esta regla de actualización, tiende a la función de valor óptima independientemente de la política. El pseudocódigo para este algoritmo es el siguiente:

```
Initialize  $Q(s, a), \forall s \in \mathcal{S}, a \in \mathcal{A}(s)$ , arbitrarily, and  $Q(\text{terminal-state}, \cdot) = 0$ 
Repeat (for each episode):
  Initialize  $S$ 
  Repeat (for each step of episode):
    Choose  $A$  from  $S$  using policy derived from  $Q$  (e.g.,  $\epsilon$ -greedy)
    Take action  $A$ , observe  $R, S'$ 
     $Q(S, A) \leftarrow Q(S, A) + \alpha [R + \gamma \max_a Q(S', a) - Q(S, A)]$ 
     $S \leftarrow S'$ ;
  until  $S$  is terminal
```

Algoritmo Q-learning [14]

En todas las versiones de los algoritmos, utilizamos los algoritmos desarrollados en el apartado de explotación para la selección de acciones dentro de la política, maximizando así la recompensa pero sin renunciar a explorar otras posibilidades que puedan resultar de mayor utilidad.

2.4 CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER

El proceso de lijado con robot colaborativo presenta varios factores de alta incidencia que pueden convertirse en inconvenientes, a la hora de llevar a cabo con éxito dicho proceso. Seguidamente se hace una revisión de los mismos.

Para el proceso de lijado, existen distintos tipos de herramientas para trabajar acopladas al cabezal de un robot. Podemos encontrar lijadoras neumáticas o eléctricas, pero en cualquiera de los casos hay que tener en cuenta que el funcionamiento de estas genera vibraciones.

Las vibraciones que generan las lijadoras al estar en funcionamiento pueden variar en función de que se traten de un tipo u otro, pero en todos los casos estas vibraciones representan un problema ya que afectan al brazo robot y de forma directa a la obtención de buenos acabados superficiales.

En algunos casos las altas vibraciones pueden provocar las paradas de protección del robot o/y afectar a procesado de las piezas, especialmente si la parada se produce cuando se encuentra sobre la superficie de la pieza.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Para realizar el lijado mediante robot resulta de interés emplear un sensor de fuerza o par instalado entre el brazo robot y la herramienta. Este tipo de sensor permite al robot gestionar la aplicación de fuerzas en los ejes X-Y-Z y de esta forma mantener la aplicación de una fuerza constante en alguno de ellos.

Pero si bien el empleo de un sensor de par supone una mejora para el proceso, también puede generar problemas derivados de la vibración de las herramientas, ya que la vibración en ocasiones, no permite que el modulo trabaje en condiciones normales provocando la distorsión la trayectoria del robot.

Así al procesar la superficie de una pieza, de repente el robot se separa elevándose mientras continua en la trayectoria que describía, o genera movimientos de subida y bajada continuamente sobre la trayectoria.

Para evitar o reducir este problema la elección del tipo de sensor es importante ya que en el mercado nos podemos encontrar sensores con distinta construcción, disponiendo algunos de juntas anti vibración.



Distintos modelos de sensor de fuerza.

Fuente: onrobot.com / robotiq.com / roscomponents.com

Otro aspecto a tener en cuenta es el entorno de trabajo. Para el lijado de piezas planas, por ejemplo, es necesario tener una buena sujeción de las piezas para que estas no sean desplazadas durante el proceso por la lijadora. Además una buena nivelación de la superficie permitirá obtener mejores resultados, independientemente de que se emplee un módulo de control de fuerza.

“COLARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

En cuanto a piezas con biselados o piezas con volúmenes complejos, como piezas curvadas, el proceso de lijado con robot es más complicado.

Si bien en el proceso manual con una misma herramienta, el operario puede acceder a zonas más pequeñas y complicadas haciendo un giro con la mano y empleando solo un área de la lija para acceder a dichas zonas. Con el robot es necesario cambiar de herramienta usando una más pequeña para dichas zonas o hacer programaciones más complejas (P.e.: posicionando la herramienta en posición inclinada) que pueden influir en los acabados superficiales.

También resulta difícil adaptar a la automatización, la eliminación de defectos o excesos de materiales.

Al realizarlo un operario, este puede identificarlas de forma visual e incidir con mayor fuerza o durante más tiempo sobre una zona con defectos.

Además de los factores anteriores, a tener en cuenta para la automatización del proceso de lijado, se ha realizado una toma de datos mediante un cuestionario a operarios expertos, a fin de caracterizar el proceso manual.

Los resultados resumidos del cuestionario se presentan seguidamente:

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

1. Tipos de fallos que se pueden presentar simultáneamente en una pieza en la fase de lijado.

- Piel de Naranja
- Chorreras
- Rebabas

¿Se solucionan todas con lijado? Sí

¿Con el mismo tipo? Sí

2. Forma de lijado. Circuito de la lija sobre el tablero. Círculos, zigzag, paralelas, a favor de la veta, a contraveta. ¿Cada tipo de error usa una trayectoria diferente?

Generalmente se realiza un circuito en forma de S (zigzag), y en el caso de algún defecto se realiza más pasadas sobre la superficie.

3. ¿Cada tipo de acabado tiene un lijado diferente?

Sí, pero solo utilizan un tipo

¿Se lija igual un acabado mate, que otro brillo, que un lacado?

En su proceso sí

4. ¿Se lija todo el tablero o solo la zona del fallo?

Todo

5. ¿Cómo se detecta un fallo para proceder a lijar?

Primeramente se realiza un lijado de toda la pieza, posteriormente se realiza un soplado para eliminar el polvo y proceder a una inspección visual de la pieza, se detecta por el cambio de color de toda la superficie, cuando es más oscura que el resto indica que es necesario una pasada adicional cómo mínimo.

6. ¿Qué tipos de lijado se suelen realizar? (igualar superficies, preparado pintado,...)

Para igualar superficies.

7. ¿Qué tipo de lija se utilizan?

Piramidal 280

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

8. ¿Existe diferente r.p.m. de lijado?

10.000 rpm máximo

9. ¿Cuándo se cambia de lija? ¿Tiempo, jornadas, pasadas.....? ¿Cómo se detecta que la lija ya no funciona correctamente y hay que cambiarla?

Cuando cuesta lijar la pieza y se deben de dar más pasadas, generalmente se cambia cada 40 piezas.

10. ¿Cómo se reconoce que la pieza está correcta para pasar a la siguiente fase? ¿Inspección visual, contraluz, inspección táctil,....?

Inspección visual por cambio de color

11. ¿Se ejerce la misma presión sobre el tablero durante toda la operación, o cambia en función de algo (defecto, el tacto de cada uno, dejarlo más pulido,)?

En principio no.

12. ¿Se ejerce mucha fuerza sobre la superficie o es más bien poca (sólo sujetar la máquina y poco más)?

Más bien poca

13. ¿La lijadora se pone plana sobre la superficie a lijar o se realizar el lijado inclinando unos grados la lijadora? ¿Cuándo se ataca la pieza inclinando la lija (acceder a rincones, eliminar un defecto detectado,...)?

Tiene una ligera inclinación la lijadora, y sobre todo cuando está en los rincones, Además la lijadora tiene una espuma entre el plato y la lija que permite adaptarse a la forma de la pieza y repartir uniformemente la fuerza.

2.5 DISEÑO CONCEPTUAL DE LAS SOLUCIONES

2.5.1 APRENDIZAJE POR DEMOSTRACIÓN

Tras analizar el proceso de lijado se han identificado diferentes parámetros que afectan al mismo y que hay que tener en cuenta para la correcta ejecución del mismo.

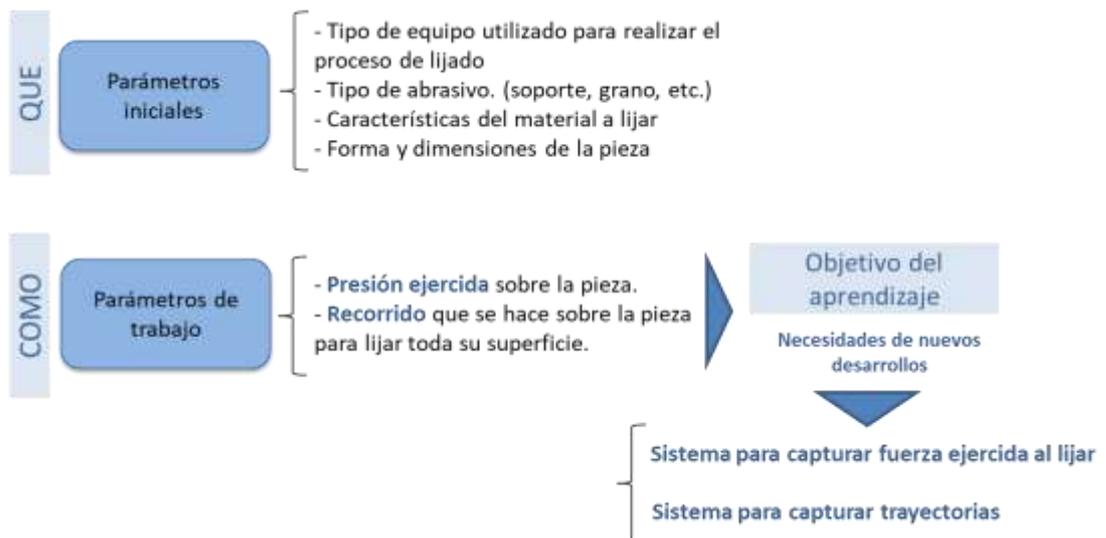
Entre los parámetros identificados tenemos parámetros internos y parámetros externos.

- Parámetros iniciales:
 - Tipo de equipo utilizado para realizar el proceso de lijado
 - Tipo de abrasivo. (soporte, grano, etc.)

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

- Características del material a lijar
 - Forma y dimensiones de la pieza
- Parámetros de trabajo:
- Presión ejercida sobre la pieza.
 - Recorrido que se hace sobre la pieza para lijar toda su superficie.



Planificación aprendizaje por demostración.

Fuente: Adimme.

Los parámetros iniciales están relacionado con “QUE” se utiliza en el proceso, mientras que los parámetros de trabajo están relacionados con “COMO” se lleva a cabo el lijado, y por tanto directamente vinculados a la experiencia del operario o experto en el proceso de lijado.

El experto en base a los parámetros iniciales ejecutará el proceso de lijado para conseguir el lijado correcto de las piezas. Los parámetros de trabajo están condicionados a los parámetros iniciales, pudiendo variar estos para conseguir el resultado deseado.

Los parámetros iniciales que no depende del experto, estos parámetros que en general no son observables, a excepción de la Forma y dimensiones de la pieza, aspecto que se puede identificar a través de sistemas de visión. Para poder registrar los mismos sería necesario introducir la información de forma previa a la ejecución del trabajo.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

Para “observar” los parámetros de presión y recorrido, es necesario implementar sensores que permitan captar dichos parámetros, para que una vez captados procesarlos y traducirlos al lenguaje máquina, de forma que el robot aprenda.

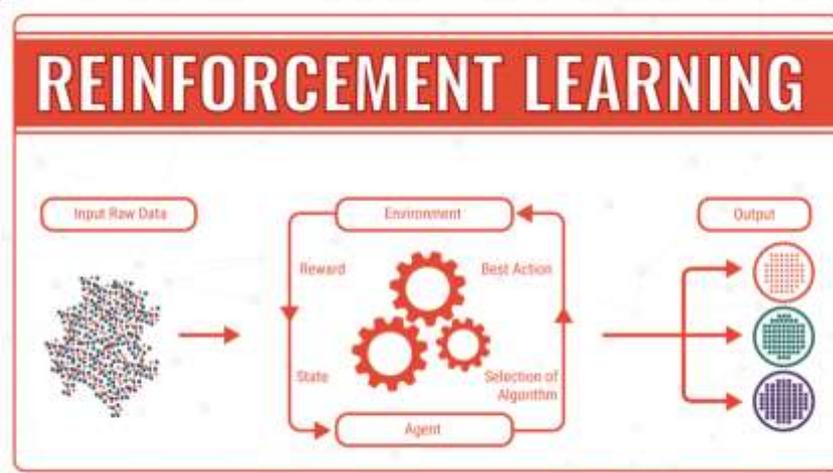
Por tanto, para llevar a cabo del proceso de aprendizaje se requiere del desarrollo previo de dos sistemas que permitan capturar los parámetros de trabajo:

- (1) Un sistema de captura de la fuerza ejercida al lijar.
- (2) Un sistema de captura de trayectorias de lijado.

El tipo de equipo de lijado utilizado por el robot será similar al utilizado por el operario, así como el tipo de lija, con lo que estos parámetros iniciales no será necesario que los introduzcamos en el sistema, y serán fijos en el sistema de aprendizaje

2.5.2 APRENDIZAJE POR REFUERZO

El aprendizaje por refuerzo recae dentro de la rama de conocimiento conocida como aprendizaje automático. Tal como se ha desarrollado en secciones anteriores, en este sistema, los modelos aprenden a partir de la experiencia, mediante un proceso de prueba y error, y de la utilización de un sistema de recompensa que valora los resultados obtenidos, para aprender a realizar su tarea.



Esquema Aprendizaje por Refuerzo.

Fuente: bigdata-madesimple.com

Es necesario ahora encontrar cómo adaptar el sistema de aprendizaje por refuerzo al sistema de lijado robótico. Para ello, es necesario definir todos los elementos de un proceso de decisión de Markov para tener una base sólida sobre la que trabajar

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Estados

En este caso, se va a definir un conjunto de estados en el que cada posible estado represente una configuración de lijado. Estas configuraciones vendrán dadas por dos variables:

- La fuerza que ejercerá el robot sobre la pieza a lijar
- El patrón de lijado que seguirá el robot (lineal, espiral y orbital)

En este caso, tendremos que:

$$S = \{s_{i,j,k} \mid s_{i,j,k} \in \mathcal{M}_{m,n,p}\}$$

Dónde $\mathcal{M}_{m,n,p}$ es una matriz tridimensional en la que las dos primeras dimensiones representan las posibles fuerzas ordenadas de menor a mayor, y la última con $p = 3$ representa el tipo de lijado. De esta forma, $s_{1,2,3}$ representa la el valor de fuerza que se encuentra en la posición 1,2 y el tipo de lijado 3.

Acciones

En este caso las acciones posibles en cada uno de los estados serán los movimientos a las 6 posiciones de la matriz adyacentes al estado actual. Si bien teóricamente las 6 acciones son equivalentes, desde un punto de vista conceptual se pueden entender como:

1. Aumentar la fuerza
2. Disminuir la fuerza
3. Aumentar mucho la fuerza
4. Disminuir mucho la fuerza
5. Siguiendo tipo de lijado
6. Anterior tipo de lijado

Transiciones

Para este desarrollo las transiciones serán deterministas, es decir, suponiendo que mediante la acción a desde el estado s lleve al estado s' entonces:

$$P(s' \mid a, s) = 1$$

Y por consiguiente:

$$P(s'' \mid a, s) = 0 \text{ con } s'' \neq s'$$

Estado inicial

Nuestro estado inicial está el punto intermedio de la matriz, es decir $s_{\frac{m}{2}, \frac{n}{2}, 1}$

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Factor de descuento

Utilizaremos un factor de descuento $\gamma = 0.9$

Recompensas

La recompensa debe ser mejor si la ejecución de la configuración seleccionada es mejor. Es por esto que la recompensa será otorgada siguiendo 2 criterios: la valoración subjetiva de los operarios y el valor de rugosidad obtenido mediante mediciones con rugosímetro. Permitiendo así premiar al algoritmo cuando realiza un buen trabajo.

Dado que el sistema por refuerzo está pensado para el mundo digital, la reducción de parámetros sobre los que ejecutar la acción, resulta imprescindible para poder realizar un aprendizaje sobre la acción correcta.

Por ello se ha decidido fijar algunas de las variables entradas como son las r.p.m de la maquina lijadora, la velocidad del TPC o lo que es lo mismo la velocidad de ejecución del programa de lijado, el tipo de abrasivo y dejando para el aprendizaje las variables de fuerza y tipo de programa a fin poder aprender según los resultados obtenidos por las combinaciones de ambas.

Con esto tenemos definido nuestro proceso de decisión de Markov sobre el que podemos aplicar los algoritmos de aprendizaje por refuerzo definidos anteriormente, en especial el aprendizaje mediante Q-learning.

2.6 REFERENCIAS

- [1] www.boatindustry.es
- [2] https://www.youtube.com/watch?time_continue=75&v=EdlUAJzGOA0&feature=emb_title
- [3] https://blog.robotiq.com/hubfs/Finishing%20Copilot%20Product%20Sheets/Finishing%20Copilot_Product%20Sheet_NOV2019_SPA.pdf?_ga=2.265779407.1139212156.1600086921-593540884.1589986609
- [4] <https://onrobot.com/es>
- [5] https://www.youtube.com/watch?time_continue=16&v=yjcv81sBrkg&feature=emb_title
- [6] <https://www.dynabrade.com/>
- [7] <https://www.universal-robots.com/plus/urplus-components/process-end-effectors/active-orbital-system/>
- [8] https://www.ati-ia.com/es-MX/Products/deburr/deburring_finish_main.aspx
- [9] Sander, M., Aguirre, A., and Benavides, F. (2016). Humanoid robot learning by demonstration based on visual bootstrapping technique. In 2016 XLII Latin American Computing Conference (CLEI), pages 1-8.
- [10] https://www.youtube.com/watch?v=0HuwavBxqp8&feature=emb_rel_end

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

[11] Breazeal, C. and Scassellati, B. (2002). Imitation in animals and artifacts. chapter Challenges in Building Robots That Imitate People, pages 363-390. MIT Press, Cambridge, MA, USA.

[12] Bakker, P.; Kuniyoshi, Y. Robot see, robot do: An overview of robot imitation. In Proceedings of the AISB96 Workshop on Learning in Robots and Animals, Kobe, Japan, 12–17 May 2009; pp. 3–11.

[13] www.bigdata-madesimple.com

[14] Sutton, R. S. and Barto, A. G. (2014). Reinforcement Learning: An introduction. The MIT Press, Cambridge, MA, USA

3 CARACTERIZACIÓN DE SOLUCIONES

El objetivo de este paquete de trabajo es desarrollar los dos modelos de aprendizaje objeto del proyecto, para el caso de aplicación (lijado) a partir de las soluciones planteadas en el PT anterior. Este desarrollo implica a su vez el desarrollo de los interfaces HRI necesarios, desarrollo de redes neuronales, función de recompensa, metodología de pruebas, etc.

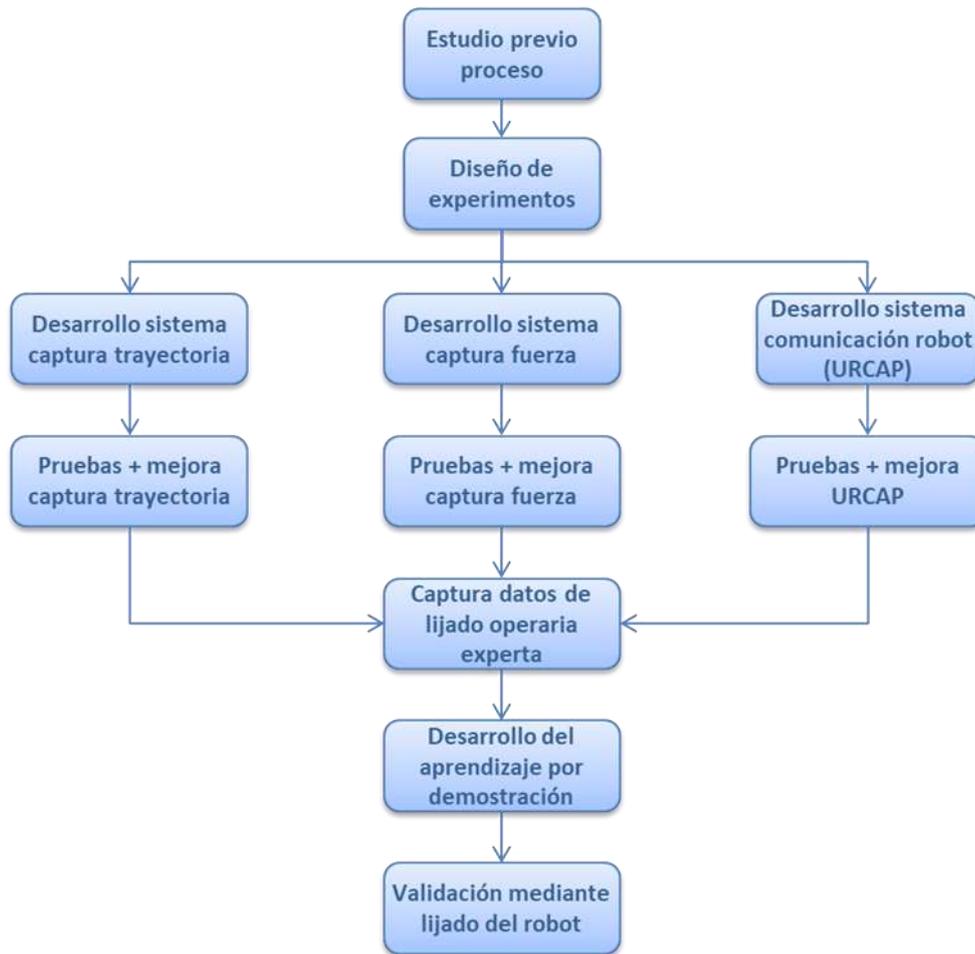
3.1 MODELO DE APRENDIZAJE POR DEMOSTRACIÓN

Para definir este modelo en primer lugar se ha llevado a cabo un estudio previo del proceso para identificar la capacidad del robot Robot UR10 CB para ejecutar un proceso de lijado de piezas planas para mobiliario.

A continuación, se ha llevado a cabo el diseño de experimentos a realizar para la generación del aprendizaje por demostración. Para llevarlo a cabo se ha hecho necesario desarrollar un sistemas de captura de trayectoria de la mano de del operario mientras realiza el lijado manual, un sistema de captura de datos de la fuerza ejercida durante el proceso de lijado, así como un sistema capaz de recibir los ficheros de trayectoria de lijado y convertirlo en programa de robot (denominado URCAP). Una vez desarrollados los tres sistemas se han testado de forma individual en un entorno de laboratorio en las instalaciones de AIDIMME, implementando las mejoras pertinentes.

Posteriormente se ha llevado a cabo una captura de datos de un proceso de lijado real en las instalaciones de la empresa MICUNA. Los datos capturados para una de las piezas lijadas han sido empleados para definir el modelo de aprendizaje por demostración. Finalmente, se ha validado el modelo desarrollado.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para robots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Flujo de trabajo seguido para desarrollar el modelo de aprendizaje por demostración.

Fuente: AIDIMME

3.1.1 ANÁLISIS PREVIO DEL PROCESO DE LIJADO

Previamente al diseño y desarrollo de pruebas, se ha realizado un estudio preliminar para estudiar la viabilidad del proceso de lijado automatizado mediante el robot colaborativo y comprobar la influencia de algunas variables sobre el resultado final del proceso, así como identificar si en alguno de los casos se obtienen los acabados mínimos deseables.

Como proceso de referencia se ha tomado un proceso de lijado de piezas planas con piezas y herramientas similares a una de las empresas fabricantes de mobiliario que participa en el proyecto.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Se han empleado piezas de tablero de DM crudo de dimensión 500x300 mm, con un fondo de color aplicado en empresa piloto, con las mismas características que las piezas de fabricación de dicha empresa. A estas piezas se les ha realizado el proceso de lijado empleando un programa en forma de zig-zag con el robot colaborativo, en este caso un Universal Robot UR10 CB series.

Se ha empleado un cabezal de lijado neumático para robot que permite variar las r.p.m. mediante la presión de aire aplicado.

El abrasivo empleado para las pruebas es el mismo empleado en la empresa durante el proceso de referencia, se trata de una lija de disco en soporte papel de grano 280.

En el proceso se han modificado los parámetros de velocidad de trabajo, es decir velocidad con la que el robot ha ejecutado el trabajo y las r.p.m. de la lijadora mediante la reducción de los bares de presión de aire.

Las combinaciones de parámetros para la valoración inicial han sido las siguientes:

Nº PIEZA	Velocidad (%)	Presión (bar)
0	90	8
1	50	8
3	100	6
5	50	6
6	Pieza control Lijada a mano	
7	100	8

Tabla combinaciones parámetros.

Fuente: AIDIMME.

Como se puede comprobar en la tabla anterior, se ha realizado el lijado de una pieza de forma manual (pieza nº 6) que se realiza en fábrica, para tener un grupo de control y poder comparar con el resto de piezas procesadas automáticamente.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Detalle aplicación lijado robotizado.

Fuente: AIDIMME.

Tras la realización del proceso de lijado de las piezas, se ha aplicado el producto de acabado final para obtener el resultado de pieza final.

Con las piezas con la terminación de acabado, se ha realizado la valoración de las mismas por parte de la empresa a fin de obtener cuales son las que cumplen con la calidad de acabado superficial.



Piezas empleadas y detalle de marcado identificativo.

Fuente: AIDIMME.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

En esta valoración se tiene en cuenta 2 características:

- a. Anclaje del acabado
- b. Textura de acabado

Para el anclaje se realiza un rallado en la superficie de las piezas y se intenta extraer el material de acabado, para comprobar si este permanece en la pieza o se levanta. El resultado de la prueba de anclaje para las piezas de prueba se demuestra correcto en todos los casos.

Tras la prueba de anclaje se ha realizado una comprobación del acabado superficial de las piezas. Esto se realiza de forma manual y en base a la experiencia del personal de la empresa participante, por lo que los valores tienen cierto nivel de subjetividad y dependerá de la experiencia del operario que lo realiza. Para obtener una mejor valoración de dichos acabados se ha realizado la prueba con varios operarios de la sección de acabados y montaje, que han realizado una valoración de los acabados superficiales de cada pieza dando una puntuación del 1 al 10. Siendo el 1 para aquellas de menor calidad y 10 para las piezas de mayor calidad.

Los resultados de las valoraciones han sido las siguientes:

Textura / Acabado				
Nº PIEZA	Oper.1	Oper.2	Oper.3	Oper.4
0		6	7	2
1	8	10	8	10
3	2	2	4	8
5	8	8	9	10
6		10	8	4
7	4	4	6	6

Valoración de piezas por operarios expertos.

Fuente: AIDIMME (Colaboración Micuna).

En las valoraciones han tenido en cuenta que no se observen surcos en la pieza, que no exista defecto de piel de naranja, ni existan otros defectos como residuos, burbujas...

De esta valoración se obtiene que las piezas número 1 y número 5, son las que presentan la mejor calidad superficial tras el proceso completo

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

De ésta prueba inicial se desprende que el robot empleado en el desarrollo del proyecto es capaz de alcanzar unos resultados de lijado óptimos o por lo menos similares a los obtenidos por un operario experto en el proceso. Por tanto, es factible llegar a desarrollar un proceso de aprendizaje por demostración humana, que permita alcanzar resultados de calidad del lijado iguales al de un proceso manual.

Comprobada la viabilidad de la automatización del proceso mediante el empleo del robot colaborativo. En los apartados siguientes se describe el desarrollo de las pruebas del entrenamiento supervisado por demostración humana de los algoritmos.

3.1.2 CAPTURA DE DATOS DEL OPERARIO. PRESIÓN.

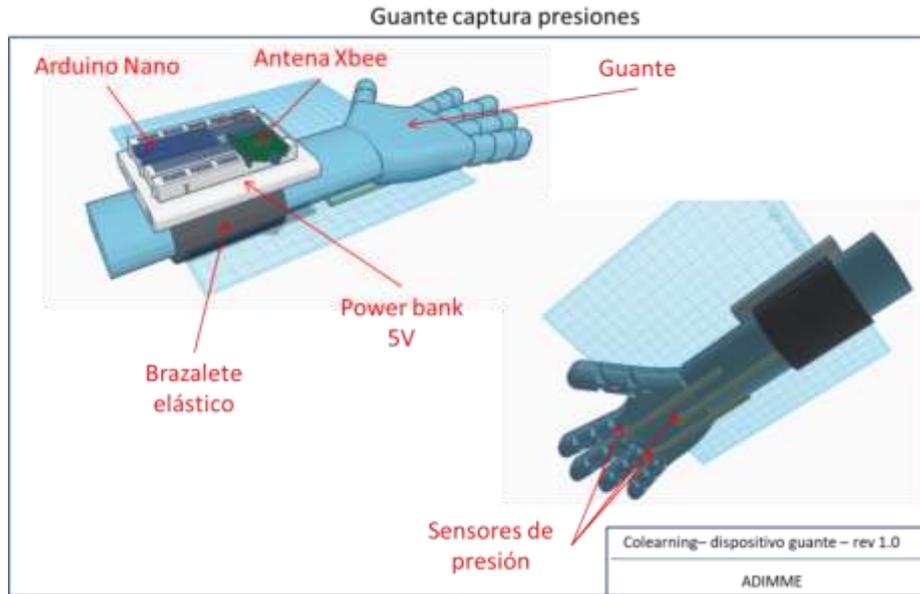
Para obtener un dataset de datos de fuerza ejercida por un operario durante el proceso de lijado, con el que poder llevar a cabo el desarrollo del modelo de aprendizaje del robot se ha generado un sistema de captura de datos basado en los siguientes componentes:

- Un guante con sensores de fuerza incorporados en los puntos de la palma de la mano en los que mayor presión se ejerce.
- Un dispositivo de captura de datos de los sensores, capaz de emitir los datos de forma inalámbrica.
- Un dispositivo receptor de los datos de fuerza ejercida.
- Un software que permita registrar el inicio y fin del lijado de cada pieza, así como generar el guardado de los archivos correspondientes.

A través de éste sistema se miden los datos de fuerza ejercida por el operario sobre la maquina lijadora en el proceso de lijado de piezas, a fin de conocer la magnitud de dichas fuerzas, y si estas son aplicadas de forma constante y homogénea en las piezas durante el proceso o varían en función de alguna otra variable como pueden ser defectos en la superficie, mayor cantidad de material aplicado, gotas, etc.

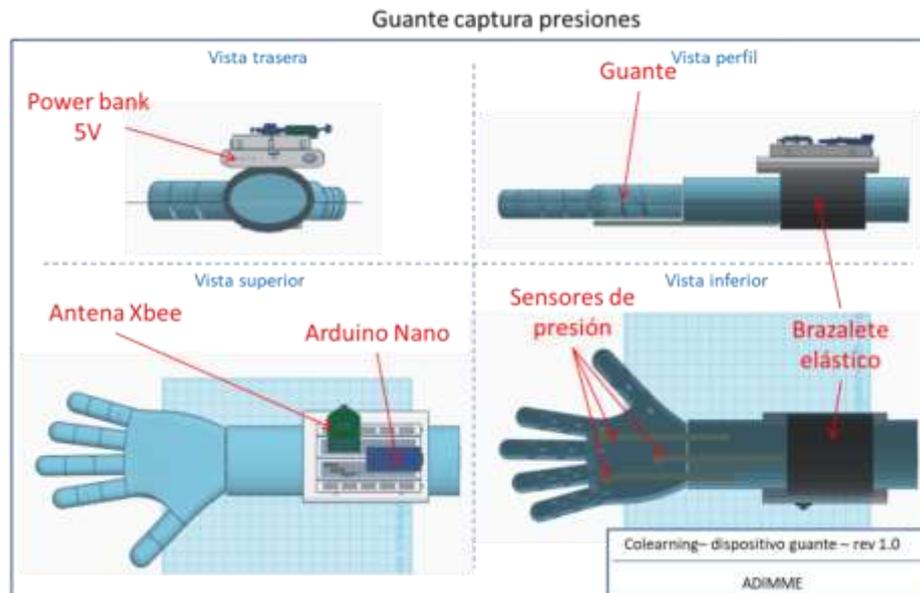
En las siguientes imágenes se muestra unos bocetos 3D de la ubicación de los sensores de fuerza en el guante y los componentes que irán ubicados en el brazaete.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Detalle del guante con sensores 1.

Fuente: AIDIMME



Detalle del guante con sensores 2.

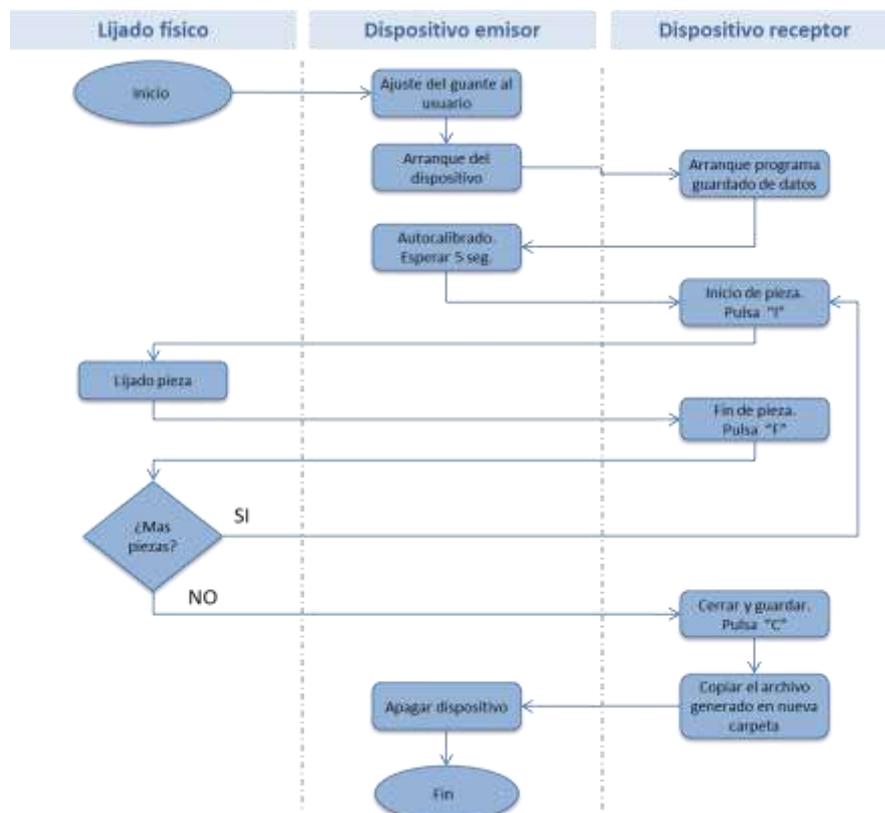
Fuente: AIDIMME

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Para proceder al registro de todos los datos generados se desarrolla un pequeño software que permite:

- Identificar cuando se empieza a lijar una pieza.
- Cuando se finaliza el lijado de una pieza.
- Identificar el número de pieza lijada.
- Guardar los datos en un fichero .txt con un timestamp.

El software se desarrolla en entorno Processing. A continuación se muestra un diagrama de flujo donde se refleja la interacción del usuario entre el proceso de lijado, el dispositivo emisor y el software de registro.



Esquema captación datos.

Fuente: AIDIMME.

A continuación se muestran algunas pruebas iniciales de testeo del sistema completo.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

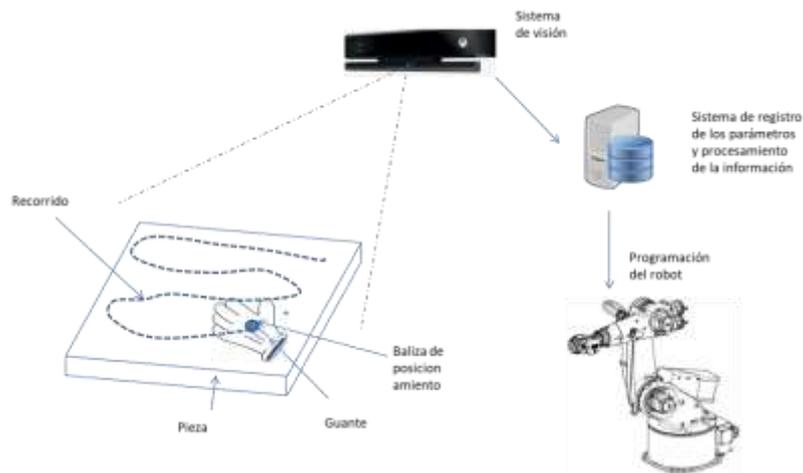


Testeo prototipo.

Fuente: AIDIMME.

3.1.3 CAPTURA DE DATOS DEL OPERARIO. TRAYECTORIAS.

Para identificar las trayectorias seguidas se propone la utilización de un sistema de visión artificial 3D, que sea capaz de generar una nube de puntos a partir del recorrido realizado.



Esquema captación datos.

Fuente: AIDIMME.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Se trata de obtener un mapa o esquema en el tiempo de las trayectorias empleadas por el operario al realizar el lijado de las piezas. Con el fin de conseguir patrones de trayectorias concretos para posterior realización de la aplicación mediante el uso del robot colaborativo.

El sistema de captura de datos basado en los siguientes componentes:

- Cámara 3D instalada de forma que capture al operario en el puesto donde se realizará la operación de lijado.
- PC o portátil conectado a la cámara mediante cable USB-C para la transmisión de las imágenes capturadas.
- Un software de captura de movimiento que registrará el inicio y fin del lijado de cada pieza, y generará el registro los archivos correspondientes.

La cámara a emplear para tal cometido es el modelo Intel RealSense D455. Aunque este modelo no es realmente una cámara 3D sino un modelo 2.5, reúne las características necesarias para el trabajo requerido.

Por otro lado el software que se ha empleado es el Kit de desarrollo (SDK) Cubemos Skeleton Tracking. Instalado y registrado correctamente. Es un sistema IA en concreto de Deep Learning para el reconocimiento y seguimiento de personas de un ambiente. Permite un máximo de 5 personas y 18 puntos por persona. Este sistema requiere que nuestro sistema tenga una CPU potente (CPUs: 6th to 10th generation Intel® Core™ and Xeon® Processors).

El programa procesa la secuencia de imágenes proveniente de la cámara de video con el módulo “Skeleton Tracker”. Este módulo realiza una identificación de las personas que aparecen en una imagen (skeletons) así como identifica la posición de las distintas articulaciones y otros puntos de referencia (joints) de cada uno de los cuerpos identificados.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

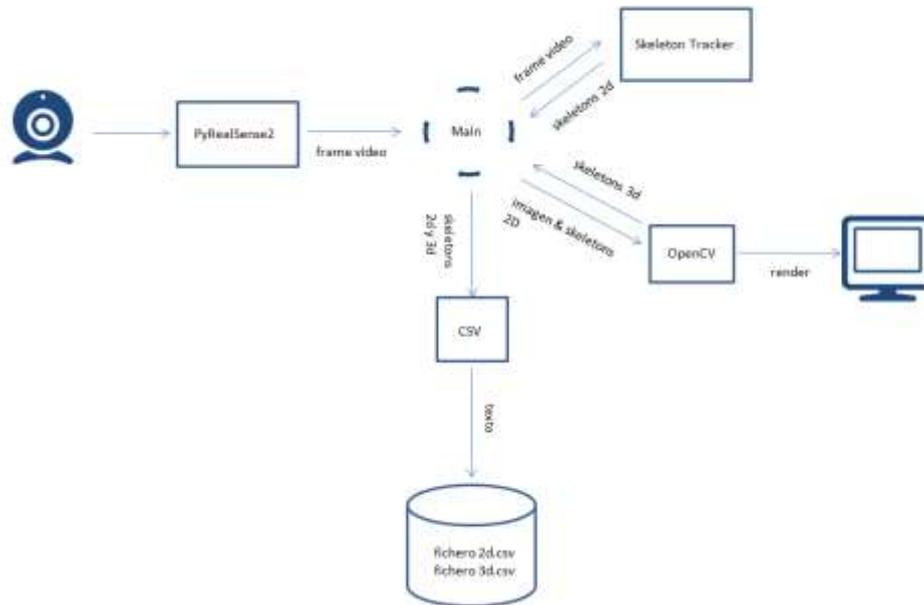


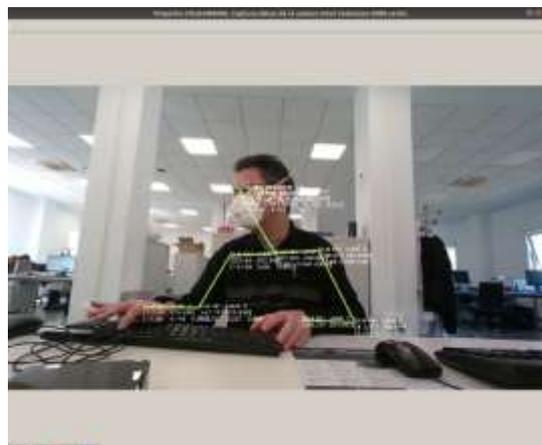
Diagrama general del funcionamiento de la aplicación.

Fuente: AIDIMME.

La identificación se realiza en tiempo real pudiéndose observar en el display o monitor del sistema donde se ejecuta la misma.

Por último, permite grabar la información identificada de los cuerpos y sus articulaciones en ficheros de texto con formato CSV para su posterior tratamiento.

Al ejecutarse, el programa abre una ventana donde se muestran los “renders” de los cuerpos identificados en la imagen y de sus articulaciones.



Ejemplo articulaciones detectadas. Fuente: AIDIMME.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

3.1.4 PRUEBAS CON EL SISTEMA DE CAPTURA DE DATOS

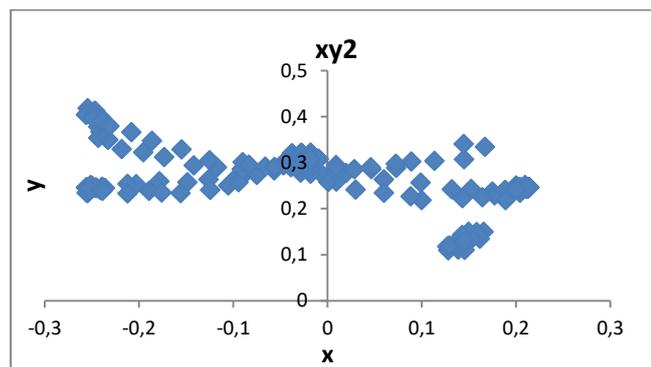
Al igual que en el caso anterior, se procede a ejecutar un proceso de lijado en las mismas condiciones que las descritas en el apartado 2.1. mediante el sistema de visión 3D y el software de captura de datos se recogen las trayectorias de las 5 piezas lijadas.



Prueba realizada con el sistema de visión 3D.

Fuente: AIDIMME.

En la siguiente imagen se puede visualizar los puntos grabados por la cámara durante el grabado del archivo de setup.



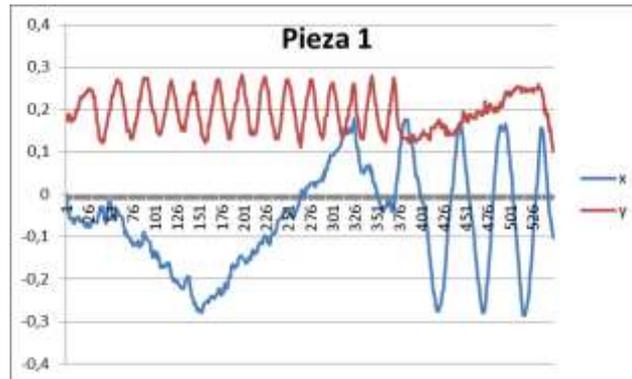
Puntos registrados durante la grabación del archivo de setup.

Fuente: AIDIMME.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

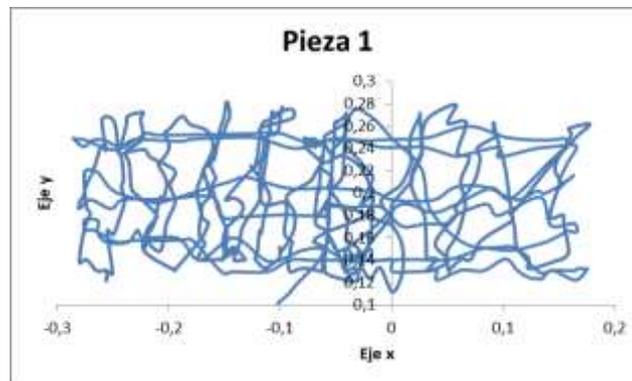
Con éste archivo, se puede obtener el rango de las dimensiones de la pieza medido por la cámara. Ésta información será necesaria para realizar el escalado de los datos ha las dimensiones reales de la pieza.

Las trayectorias x,y registradas para una de las piezas se pueden observar en las siguientes gráficas.



Gráfica de puntos x,y en el tiempo

Fuente: AIDIMME.



Gráfica de puntos x,y

Fuente: AIDIMME.

Para la generación del modelo de trayectorias a enviar al robot para ejecutar el proceso de lijado hay que tener en cuenta una serie de barreras a solventar:

- La cámara de visión 3D captura la posición de la muñeca (puntos x, y) del operario, no del centro de la lijadora. El desfase entre la muñeca y el centro de la lijadora no es constante ya que el operario puede realizar giros de muñeca durante el lijado.
- La precisión del posicionamiento de la muñeca por parte de la cámara 3D tiene un pequeño error que genera algo de ruido en la trayectoria capturada.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

- La escala de la cámara no es una escala real de la pieza. Se requerirá de un posterior procesamiento para ajustar la escala de los puntos x,y.
- La perspectiva de la cámara hace que la pieza se reconozca como un paralelepípedo de tipo trapezoidal y no rectangular.



Esquema de problemáticas para generar el archivo de trayectorias.

Fuente: AIDIMME.

Todas estas barreras implican un procesamiento intenso de la señal capturada por la cámara 3D antes de generar el fichero a enviar al robot.

3.1.5 DESARROLLO DEL MODELO DE APRENDIZAJE

Una vez probados los sistemas desarrollados para la captura de datos en el laboratorio, se prueban y validan en un entorno de trabajo real, transformando los datos de un operario experto en un programa de lijado de robot.

Para ello se llevan a cabo las mismas capturas de datos que en entorno de laboratorio, pero en este caso realizando el lijado de un lote amplio de piezas, pero siendo procesadas por una persona experta de la empresa colaboradora Micuna.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

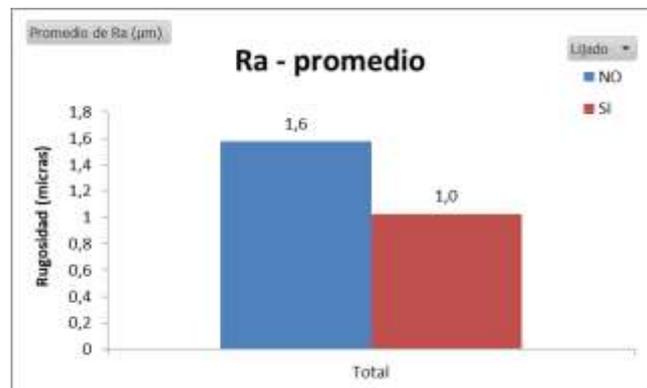


Captura de datos de operaria experta en Micuna.

Fuente: AIDIMME.

Al igual que las pruebas realizadas en laboratorio, ha sido medida la rugosidad de las piezas en distintos puntos de cada una, por ambas caras. A fin de tener un dato cuantitativo del proceso.

Tras el lijado de la operaria, la rugosidad promedio (Ra) de las 40 piezas procesadas pasaba de 1'6 micras a 1 micra, mejorando 0'6 micras.



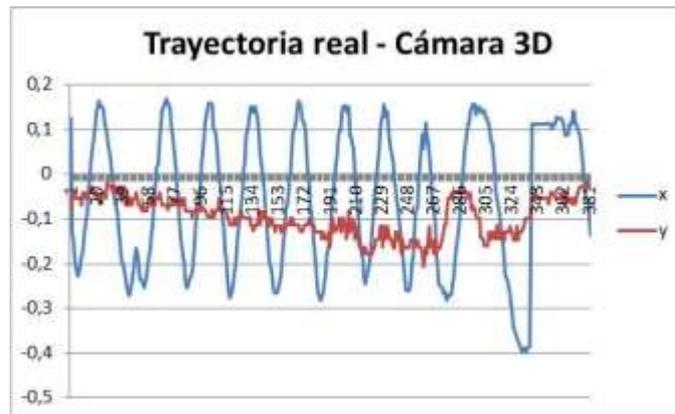
Rugosidad promedio (Ra) tras el lijado por operaria experta.

Fuente: AIDIMME.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Generación de archivo de trayectorias y datos de fuerza.

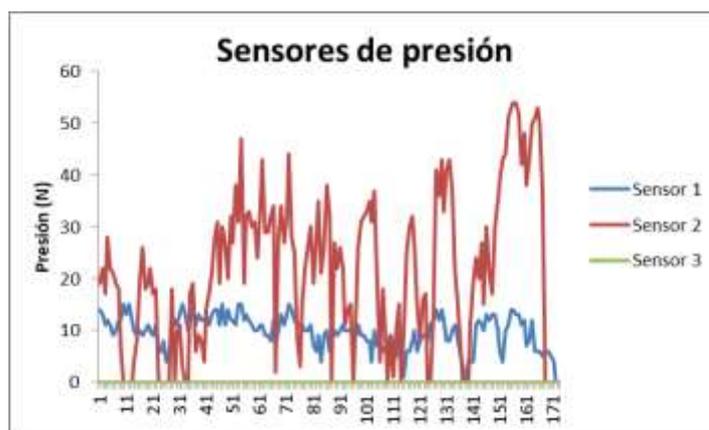
Tras la captura de datos de fuerza y trayectorias realizadas por la operaria experta en lijado, se realiza el procesado de los datos a fin de obtener datos optimizados para ambos. Los datos en bruto capturados de la operación llevada a cabo por la operaria son los que se muestran en las siguientes figuras.



Captura de datos de operaria experta en Micuna.

Fuente: AIDIMME.

En la imagen superior se observa al evolución en el tiempo de los puntos (x,y) capturados por la cámara de visión 3D sobre la muñeca de la operaria durante el proceso de lijado una de las piezas tomada como referencia.



Captura de datos de operaria experta en Micuna.

Fuente: AIDIMME.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

En la anterior imagen se observa la evolución en el tiempo de la fuerza ejercida en cada uno de los sensores de presión del guante de presión que portaba la operaria de lijado durante el proceso de lijado de una de las piezas. Se puede comprobar como toda la presión se ejerció sobre los sensores 1 y 2, ubicados en la parte superior de la palma de la mano.

Para generar un archivo de trayectorias que pueda ser empleado por el robot se han planteado 3 escenarios en los que el tratamiento y modificación del archivo original capturado por la cámara 3D se lleva a cabo de forma diferente.

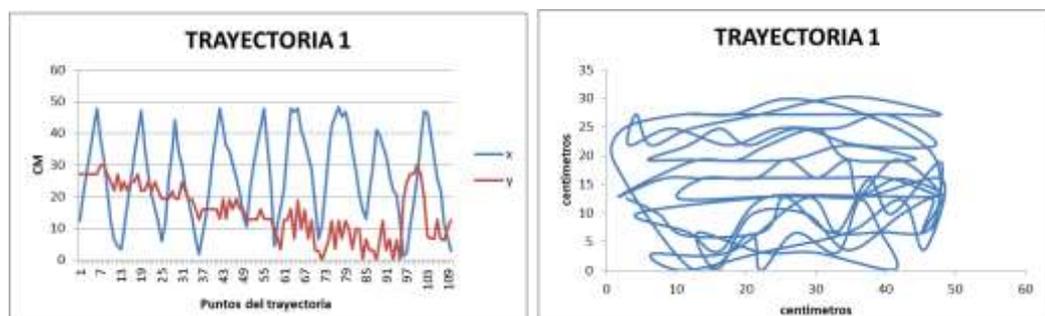
Escenario 1.

En primer lugar, se transforman todos los puntos a coordenadas incrementales, escogiendo una de las esquinas de la pieza como nuevo origen de coordenadas, y no el origen de la cámara 3D. A continuación, se escalan los valores capturados por la cámara a las dimensiones reales de la pieza.

El siguiente paso, consiste en reducir el número de puntos de la trayectoria. Para cumplir con ciertas restricciones cinemáticas que presenta el robot, el archivo de trayectoria no debe contener más de 1 punto por cada 5 mm. Por tanto, se reduce el número de puntos del archivo para cumplir con ésta restricción.

Un vez hecho esto, se transforman las coordenadas a los ejes x, y del robot, y finalmente se transforma a un archivo .json, con la cabecera de datos definida en el sistema de comunicaciones servidor-robot, donde se especifican los datos de presión, velocidad, aceleración , etc.

En las siguientes gráficas se puede apreciar la trayectoria generada para el robot para los puntos x,y a lo largo del tiempo, así como sobre los ejes x,y en la pieza real.



Gráfica fichero 1 de trayectorias.

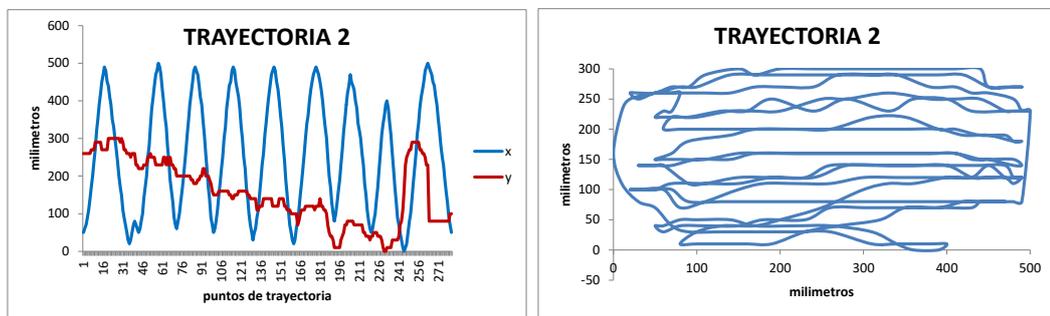
Fuente: AIDIMME.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Escenario 2.

En éste segundo escenario se lleva a cabo un suavizado exponencial de los datos en dos etapas para generar trayectorias en el robot más suaves. Como resultado del suavizado de los datos, los puntos de la trayectoria cercanos a los extremos de la pieza, se alejan de dichos extremos. Para solventar esta situación se realiza un nuevo escalado de los puntos máximos y mínimos tras el suavizado, al mínimo y máximo real de la pieza.

En las siguientes gráficas se comprueba como se ha reducido el ruido en la trayectoria, así como forzado a que el robot llegue a los extremos x, y de la pieza.



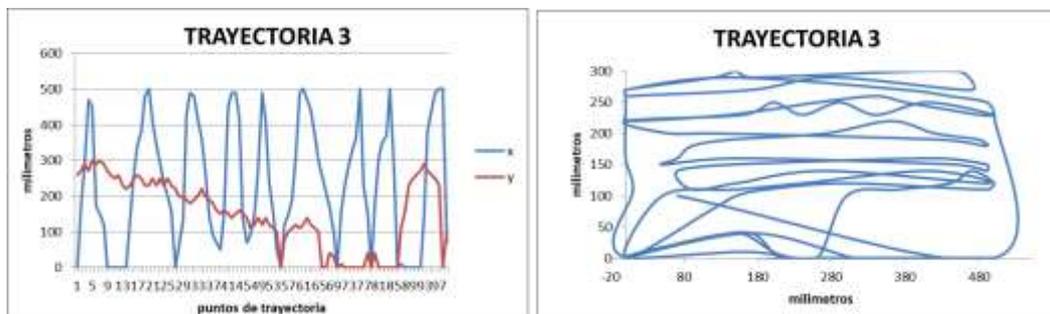
Gráfica fichero 2 de trayectorias.

Fuente: AIDIMME.

Escenario 3.

En éste último escenario lo que se ha hecho es reducir el número de puntos del archivo, para así conseguir trayectorias mas “puras” y reducir el tiempo de ciclo del robot al tener que pasar por menos puntos. También se ha forzado de forma manual a que el archivo contenga puntos de paso por las esquinas de la pieza.

En las siguientes gráficas se comprueba como quedan finalmente las trayectorias en este escenario.



Gráfica fichero 3 de trayectorias. Fuente: AIDIMME.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Ejecución del experimento.

Para poder llevar a cabo el experimento y transmitir al robot el fichero de trayectoria, junto con el resto de parámetros del programa, se ha desarrollado por el proveedor Inda Levante una URcap para el robot de Universal Robots UR16e que va a ser el empleado en el proceso automatizado como se ha comentado anteriormente.

Con dicha URcap, será posible la comunicación entre robot y algoritmo con el aprendizaje realizado, de tal forma que el brazo robot ejecute automáticamente el procesado de la pieza de la misma forma en la que la realizaría la operaria.

El proceso de validación consiste en procesar un lote de piezas con el robot con los datos del aprendizaje obtenido con el operario experto.

En este proceso, ya que se aplica el método de lijado y la fuerza tal cual se ha aprendido de la operaria experta, se deben obtener piezas con el acabado que se ajusta a los estándares de la empresa colaboradora.

No obstante, tanto los datos de trayectorias como los datos de fuerza pasan previamente por un análisis en el que se ajustan ambos datos al sistema de funcionamiento del robot colaborativo. De ahí que sea necesario un proceso de validación para comprobar que en el proceso de transformación no se ve afectado el aprendizaje del proceso obteniéndose piezas con los acabados correctos.

Por otro lado, también se ha realizado un estudio de la velocidad y aceleración del robot así como del radio de transición óptimo, a fin de que el proceso automatizado genere un flujo de trabajo lo más aproximado al generado por la operación de forma manual, teniendo en cuenta algunas limitaciones mecánicas de los robots.

Al finalizar el proceso automatizado, se realiza la toma de rugosidad en los puntos especificados, para comprobar que las rugosidades inicial y final se ajustan a los valores obtenidos por el proceso manual.

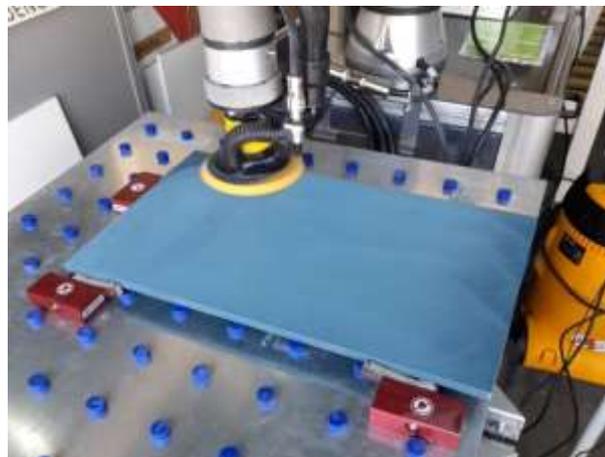
Resultados del experimento.

En primer lugar, se realizan varias pruebas con una configuración de parámetros constante (velocidad, aceleración, transición y fuerza) constante y se prueban los tres archivos de trayectoria definidos anteriormente.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

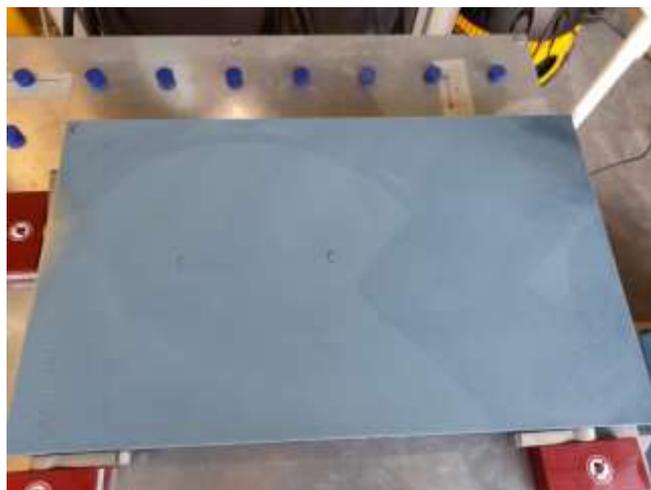
Archivo Trayectoria	Valoración cualitativa	Rugosidad: Ra (micras)	Rugosidad: Rz(micras)
Escenario 1	8	1'6	10'3
Escenario 2	7	1'8	11'2
Escenario 3	9	1'4	9'1

Tabla con valoración de las piezas procesadas por el robot. Fuente: AIDIMME.



Procesado de piezas automatizado con Aprendizaje por Demostración.

Fuente: AIDIMME.



Resultado de pieza procesada con Aprendizaje por Demostración. Fuente: AIDIMME.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

A la vista de los resultados obtenidos, la mejor calidad de lijado se obtiene en el escenario 3, tanto en la valoración cualitativa, como en la valoración cuantitativa.

Una vez garantizada la calidad del proceso de lijado se ha procedido a analizar el tiempo de ciclo del proceso de lijado por parte del robot. El tiempo medio empleado por la operaria experta se situaba en el rango 18-20 segundos/pieza (sin considerar manipulaciones, descansos, efecto fatiga, etc.).

Tras realizar diferentes pruebas para determinar el tiempo de ciclo del robot para el escenario 3, considerando variaciones de velocidad, aceleración, fuerza y transición entre puntos, se consigue un tiempo de ciclo óptimo de 30 segundos con una velocidad de 2500 mm/seg, aceleración de 500 mm/seg², fuerza 10 N y transición entre puntos de 30mm de radio de curvatura.

Conclusiones del experimento.

- La generación automática de un archivo de trayectorias para el robot, a partir de los datos capturados por demostración de un operario experto permite generar en pocos minutos un programa de robot que genera resultados satisfactorios en un proceso de lijado de piezas de mobiliario planas.
- La calidad del lijado del robot es similar a la calidad obtenida por el operario experto, tanto en valoración cualitativa, como en una valoración cuantitativa mediante la rugosidad de la pieza (parámetros Ra y Rz).
- El tiempo de ciclo unitario (tiempo de proceso por pieza) es algo superior al generado por el operario experto en torno a un 50-60%. En concreto, el operario emplea un tiempo medio de 17-20 seg / pieza, mientras el robot requiere de 30 seg/pieza debido a que una velocidad mayor provoca paros por problemas cinemáticos. Sin embargo, la diferencia de capacidad total no es relevante, ya que en el dato del tiempo de ciclo del operario no se contempla fatiga, ni tiempos de descanso, que en el caso del robot no existen.
- Sin embargo hay pequeñas deficiencias sobre las que continuar investigando en aras de alcanzar un nivel de perfección total en el proceso de aprendizaje. La información en bruto capturada sobre el trabajo del operario experto presenta un error inherente al propio sistema de captura de datos:
 - Por un lado, los puntos x,y registrados son capturados sobre la muñeca del operario y no sobre el centro de la lijadora. El operario realiza giros de muñeca con cada cambio de dirección de lijado en la pieza, por lo que no necesita extender la muñeca a los límites de la pieza en éstas zonas, y por tanto, suele existir una carencia de puntos registrados en esquinas y laterales de una pieza. Esta situación puede ser más o menos acentuada, en función del operario que realice la demostración.
 - Por otro lado, la perspectiva de la cámara de visión 3D genera una distorsión del plano x,y de la pieza, que debe ser corregida antes de generar el archivo de trayectorias final.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

- A partir de los datos en bruto se realiza una reducción y transformación de los puntos de trayectoria descritos en el apartado 4.3 del presente documento, que en algunas piezas puede dejar zonas (esquinas normalmente) sin lijar adecuadamente.
- En estos casos se requiere de una modificación “manual” del archivo de trayectorias a transmitir al robot para forzar su paso por una zona determinada de la pieza.
- La presión a ejercer por parte del robot sobre la pieza durante el lijado coincide perfectamente con el promedio de la presión registrada por los tres sensores incorporados en el guante de captura de datos proporcionado al operario experto. Presiones menores no logran un nivel de rugosidad superficial final similar a la obtenida mediante el lijado del operario experto. Presiones mayores, provocan un lijado excesivo en ciertas zonas de la pieza.
- Para optimizar el proceso de lijado mediante el robot, una vez definida la presión a ejercer y el archivo de trayectorias, debe realizarse un setup para definir la velocidad, aceleración y transición entre puntos mas adecuada, que permitan minimizar el tiempo de ciclo así como que la trayectoria seguida por el robot sea suave.
- Tras la validación de resultados del modelo en el experimento empleando los datos extraídos de expertos, el siguiente paso es la realización del piloto en la empresa colaboradora, realizando el proceso automatizado de lijado de piezas de producción propias.

3.2 MODELO DE APRENDIZAJE POR REFUERZO

En este caso se ha desarrollado un modelo de aprendizaje por refuerzo para la automatización del proceso, mediante el cual el sistema aprenda por sí mismo cual es el mejor proceso de lijado para una pieza.

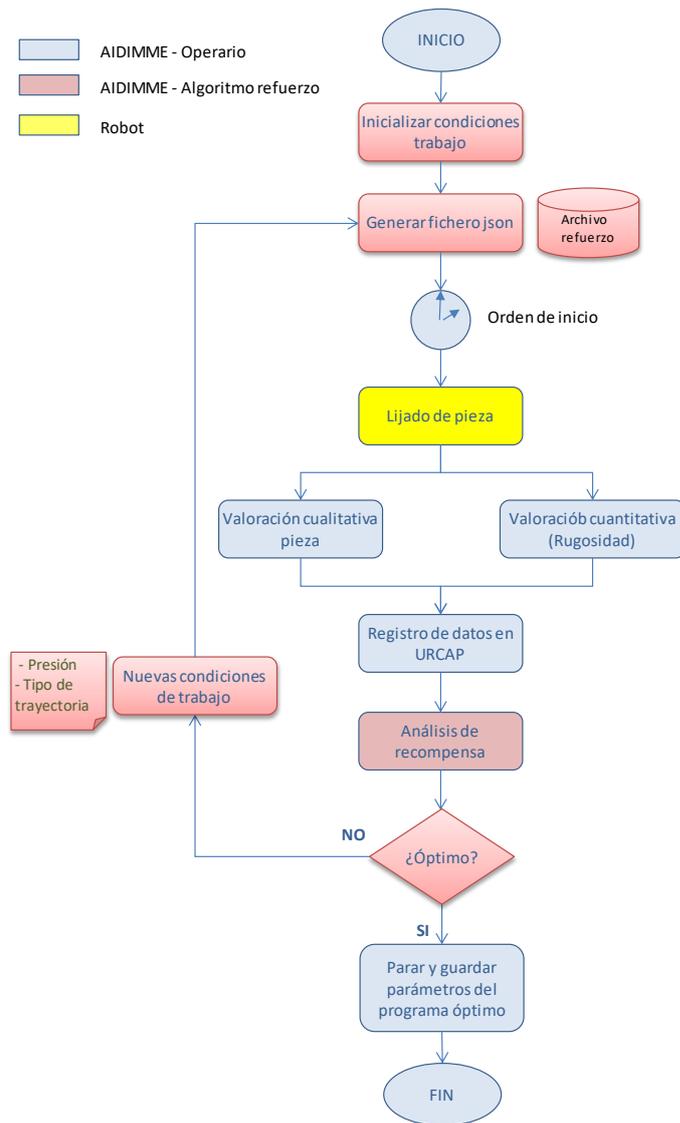
Para ello se requiere de múltiples operaciones de lijado para un modelo de pieza, variando en cada uno de ellos los parámetros de trabajo. Concretamente modificando el tipo de técnica de lijado (trayectoria) y la fuerza aplicada a dicho proceso.

A la finalización de cada lijado el sistema de aprendizaje obtiene, por parte de un intermediario humano, un input con la valoración del resultado obtenido en el acabado superficial, así como valores de rugosidad que aportaran una cuantificación del proceso.

El sistema tendrá que analizar las valoraciones obtenidas sucesivamente hasta encontrar la combinación de valores de trabajo (tipo de trayectoria y fuerza aplicada) que proporcionen el mejor de los resultados del proceso automatizado.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

En el siguiente diagrama de flujo se puede comprobar la operativa seguida para llevar a cabo el aprendizaje por refuerzo utilizando la URCAP y el algoritmo de aprendizaje desarrollados en el proyecto.



Flujo de trabajo seguido.

Fuente: AIDIMME

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Para llevar a cabo el desarrollo de un proceso de aprendizaje por refuerzo es necesario el desarrollo de algunas herramientas que permitan tanto el procesado de piezas de forma autónoma por parte del robot así como el envío y análisis de datos del modelo de aprendizaje.

La realización del experimento parte de la necesidad de establecer un sistema mediante el cual el robot sea capaz de recibir determinados datos del modelo de aprendizaje y ejecute la aplicación de forma autónoma. Previamente se habrá establecido el espacio de trabajo con unas configuraciones básicas para poder realizar dicho trabajo.

Para todo ello se ha hecho necesario el desarrollo de una URcap para el robot UR16e de Universal Robot. Esta URcap, no es más que un software integrado en el robot que permite la configuración de parámetros de trabajo, así como la comunicación bidireccional de robot-servidor, en la que está contenido el sistema de aprendizaje.

Mediante dicha aplicación se puede realizar la configuración previa del entorno de trabajo donde se establece la posición de la pieza (punto 0,0,0) y sus dimensiones de Ancho, Largo y grueso. Igualmente en esta configuración del entorno de trabajo se establecen cuales son los puntos de entrada y salida de la herramienta. Tras esta configuración inicial el sistema ya está disponible para ejecutar los diferentes trabajos de lijado con las distintas combinaciones que le envía el algoritmo de aprendizaje.

En este caso los parámetros que se van cambiando para obtener los mejores resultados de lijado son el tipo o técnica de lijado y la fuerza a ejercer por el robot. Los posibles valores para el parámetro de tipo de lijado pueden ser:

- Lijado Lineal
- Lijado Orbital
- Lijado Espiral

Por su parte los valores de fuerza variaran en el intervalo de valores de 1 a 20 Newton.

Ya que las combinaciones se envían de forma automática al robot, y serán creadas de forma autónoma por el algoritmo del aprendizaje, en la URcap se podrán visualizar los valores de ejecución que se están empleando en el apartado Información de proceso

3.2.1 DESARROLLO DEL MODELO DE APRENDIZAJE POR REFUERZO

Es necesario recordar que para implementar un sistema de aprendizaje por refuerzo, el problema debe ser modelado como un proceso de decisión de Markov (MDP). Es importante entrar en el detalle de cómo se han configurado finalmente los estados y cómo afectan las acciones a estos.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Sistema de estados y repercusión de las acciones

El conjunto de estados S está compuesto por una matriz tridimensional, de forma que cada estado $s_{i,j,k}$ representa un valor de fuerza y un tipo de lijado. El rango de valores de fuerza que se ha elegido es la intersección de aquellos que es capaz el robot de ejecutar y los que es posible de antemano comprobar que no serían adecuados para el lijado, bien por ser insuficiente o bien por dañar de forma irreparable la pieza. Es por esto que el rango de fuerza se comprende entre los valores 3 y 32. Por tanto, el agente de decisión se encontrará en una matriz de 6x5 como la que se muestra a continuación

		i					
		3	4	5	6	7	8
j		9	10	11	12	13	14
		15	16	17	18	19	20
		21	22	23	24	25	26
		27	28	29	30	31	32

De esta forma, siendo que en los lenguajes de programación, los índices de las matrices comienzan en 0, tenemos que $i \in \{0,1,2,3,4,5\}$ $j \in \{0,1,2,3,4\}$ y por tanto:

$$f = 3 + i + j * 6$$

Siendo f el valor de fuerza a aplicar al lijado.

Por otra parte, la última dimensión de la matriz pertenece al tipo de lijado de la siguiente forma:

Lineal	Orbital	Espiral
--------	---------	---------

→

k

Acciones y efecto sobre el conjunto de estados

El agente de decisión deberá navegar por este conjunto de estados para encontrar cuál es la mejor de las posibilidades para realizar el lijado, y para ello dispone de 6 acciones disponibles para moverse dentro de la matriz.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Acciones de variación del tipo de lijado

Este tipo de acciones son las más directas, simplemente permite al agente cambiar de tipo de lijado, se permite tanto el movimiento a derecha como a la izquierda. En caso de salirse por la matriz en cualquiera de los extremos, se volverá a la primera o la última de las celdas respectivamente.

Es decir, la acción *siguiente_lijado* se define mediante este pseudocódigo:

function siguiente_lijado(k):

if $k < p$:

return $k+1$

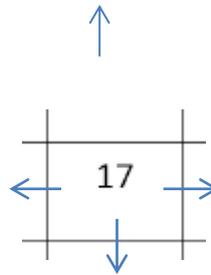
else:

return 0

Por su parte, la acción de *anterior_lijado* se define de forma análoga.

Acciones de variación de fuerza

En este caso, las acciones disponibles son 4: el desplazamiento a cada una de las 4 casillas adyacentes a cada celda.



En este caso, vamos a diseñar el comportamiento de las acciones de forma que tengan un sentido lógico. El movimiento a la derecha en general supone un aumento del nivel de fuerza, y tiene sentido que se mantenga así incluso en caso de llegar a un borde, por esto, en caso de ejecutar un movimiento a la derecha en una celda del borde derecho, desplazaremos al agente a la primera celda de la fila inferior, tal como se muestra en la imagen:

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	32

La excepción es claramente la casilla con valor 32 en la que la acción de movimiento a derecha no estará permitida.

La acción de movimiento a la izquierda es completamente análoga y se ocupa de realizar una disminución del valor de fuerza, por lo que al llegar al borde izquierdo, se moverá a la última casilla de la fila superior.

Por último, las acciones de movimientos hacia arriba y hacia abajo representa aumentos o disminuciones drásticas en el nivel de fuerza aplicado, si queremos mantener este comportamiento, entonces debemos bloquear el funcionamiento de estas acciones en los bordes.

3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	32

De esta forma pasamos de las acciones espaciales a conceptuales:

- Mover derecha -> Aumentar fuerza
- Mover izquierda -> Disminuir fuerza
- Mover arriba -> Aumentar fuerza de forma significativa
- Mover abajo -> Disminuir fuerza de forma significativa

Sistema de recompensa

Una vez el algoritmo seleccione una configuración de fuerza y estilo de lijado, el robot ejecutará el programa y este deberá ofrecer una recompensa. La recompensa debe ser mayor cuanto mejor sea el resultado, es por esto que la recompensa dependerá de dos factores:

- Utilización de un rugosímetro para la medición de la textura obtenida al realizar el lijado en tres puntos clave de la pieza. Se obtendrá la media de los valores obtenida y se ponderará sobre 10.
- Criterio subjetivo del operario que valorará la ejecución del robot de 1 a 10.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

La recompensa obtenida será la media ponderada de cada uno de estos resultados.

3.2.2 EJECUCIÓN DEL LIJADO DE PIEZAS SEGÚN MODELO DE APRENDIZAJE.

El experimento se desarrolla mediante el empleo de la aplicación que se ha denominado URCap. Una vez configurado el robot y la aplicación, el sistema desarrollado envía diferentes configuraciones de “fuerza” y “tipo de trayectoria” para la ejecución del proceso de lijado. En total hay un total de 60 combinaciones posibles de ambas variables.

En la siguiente imagen se puede observar la configuración de una pieza inicial. Donde la velocidad se fija en 75mm/s, la aceleración en 125mm/s², el diámetro de la lija es de 150mm, y el solape se fija en 0%. En ésta iteración el algoritmo ha propuesto una trayectoria de tipo lineal y una fuerza de 11 Newtons.



Imagen de parámetros enviados por el servidor al robot mediante la URCAP.

Fuente: AIDIMME

Quando el lijado de la cara de la pieza inicial ha finalizado, pasamos a la valoración y medición de valores de rugosidad en los puntos definidos para ello.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Detalle del proceso de medición de la rugosidad.

Fuente: AIDIMME

Una vez se han introducido la valoración y datos correspondientes al lijado de la pieza inicial, se le ha dado la vuelta a la pieza, para continuar procesando el lijado.

Al pulsar PLAY para iniciar la ejecución del robot, el sistema envía una nueva configuración y se inicia el lijado de nuevo. Dicho sistema va mandando las iteraciones según las valoraciones de acabado y los datos de rugosidad que son tenidas en cuenta por la función de recompensa del algoritmo, las distintas iteraciones que se han enviado en el experimento son las que se muestran en la siguiente imagen:

Iteración	Fuerza	Trayectoria
1	10	Lineal
2	4	Lineal
3	5	Lineal
4	6	Lineal
5	7	Lineal
6	8	Lineal
7	7	Lineal
8	8	Lineal
9	7	Lineal

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

10	8	Lineal
11	7	Lineal
12	8	Lineal
13	7	Lineal
14	8	Lineal
15	9	Lineal
16	15	Lineal
17	9	Lineal
18	15	Lineal
19	9	Lineal
20	15	Lineal
21	9	Lineal
22	15	Lineal
23	9	Lineal
24	15	Lineal
25	9	Lineal
26	15	Lineal
27	9	Lineal

Detalle de las combinaciones propuestas por el algoritmo de refuerzo.

Fuente: AIDIMME

Durante el proceso, se han obtenido distintos resultados de acabado superficial en función de las configuraciones enviadas por el sistema para la ejecución del lijado, por lo que al realizar un lijado y haber obtenido un resultado con una valoración determinada, en el lijado realizado a continuación se podido obtener un acabado con una valoración inferior a la anterior, ya que el sistema busca mediante las distintas iteraciones la mejor de las combinaciones.

“COLARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Dos piezas con una valoración de lijado baja.

Fuente: AIDIMME



Dos piezas con una valoración del lijado media.

Fuente: AIDIMME

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Dos piezas con una valoración del lijado alta (buena).

Fuente: AIDIMME

3.2.3 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.

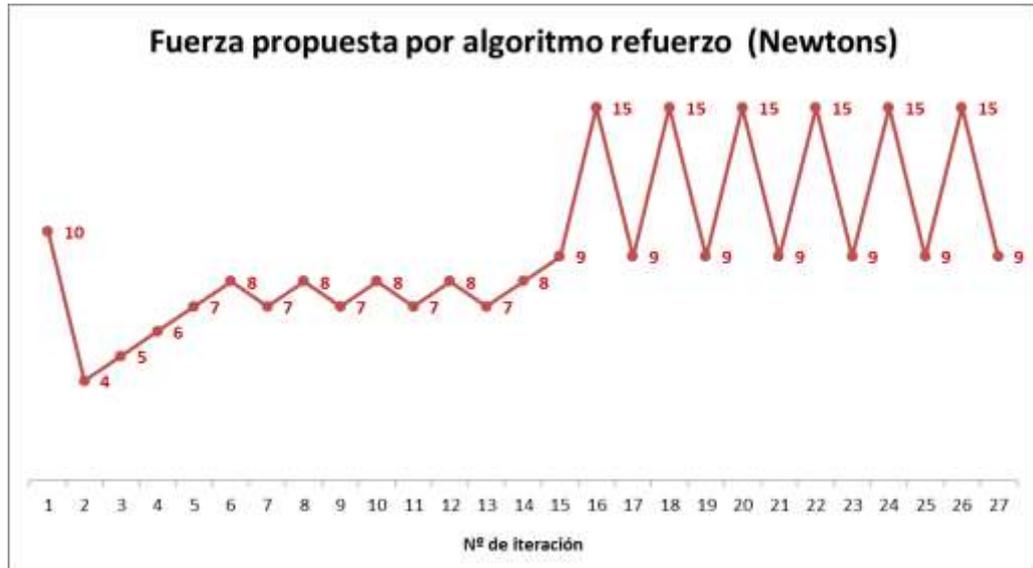
Tras el procesado de 26 piezas, los datos resultados obtenidos en cuanto a valoración de acabados superficiales y rugosidades en tres puntos (idénticos en cada pieza), se ha generado la siguiente tabla con toda la información recopilada.

Iteración	Fuerza	Trayectoria	Pieza	Valoración	1Ra	1Rt	2Ra	2Rt	3Ra	3Rt
1	10	Lineal	35A	8	2,181	22,69	1,772	12,77	1,335	9,627
2	4	Lineal	35B	8	1,48	11,46	1,476	10,13	1,15	8,573
3	5	Lineal	34A	9	1,985	16,33	1,458	12,53	1,399	10,97
4	6	Lineal	34B	9	1,537	13,91	1,267	10,94	1,278	11,29
5	7	Lineal	33A	6	1,663	14,31	1,576	14,05	1,297	11,59
6	8	Lineal	33B	7	1,745	12,67	1,304	11,61	1,296	10,77
7	7	Lineal	32A	7	1,765	13,25	1,411	11,22	1,194	9,413
8	8	Lineal	32B	9	1,526	12,45	1,565	13,12	1,5	12,12
9	7	Lineal	31A	8	1,612	11,51	1,526	13,56	1,3	10,21
10	8	Lineal	31B	9	1,785	15,72	1,166	8,624	1,274	10,5
11	7	Lineal	30a	4	1,274	10,5	1,421	10,35	1,354	9,391
12	8	Lineal	30b	8	1,606	11,29	1,27	9,498	1,347	11,24
13	7	Lineal	29a	10	1,728	13,76	1,079	8,194	1,353	13,59
14	8	Lineal	29b	8	1,721	14,71	1,417	10,93	1,256	11,11
15	9	Lineal	28a	5	1,565	11,57	1,277	11,14	1,266	9,488
16	15	Lineal	28b	5	1,411	12,4	1,323	10,55	1,242	9,23
17	9	Lineal	27A	3	1,809	21,31	1,275	11,84	1,352	11,89
18	15	Lineal	27b	4	1,636	13,7	1,517	12,48	1,382	12,86
19	9	Lineal	26a	4	1,458	10,52	1,408	13,4	1,655	12,95
20	15	Lineal	26b	1	1,575	12,51	1,323	10,29	1,285	9,479
21	9	Lineal	25a	5	1,439	12,36	1,259	9,585	1,314	9,76
22	15	Lineal	25b	1	1,69	11,35	1,023	10	1,181	9,896
23	9	Lineal	24a	4	1,387	12,03	1,448	10,06	1,228	9,761
24	15	Lineal	24b	3	1,364	12,81	1,311	11,81	1,286	12,94
25	9	Lineal	23a	4	1,703	13,25	1,328	12,19	1,141	8,76
26	15	Lineal	23b	2	1,658	11,9	1,33	10,76	1,21	13,16
27	9	Lineal								

Tabla resumen con los resultados del aprendizaje. Fuente: AIDIMME

“COLARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

El algoritmo de aprendizaje por refuerzo ha propuesto diferentes tipos de fuerza a aplicar según lo que se muestra en la siguiente gráfica.



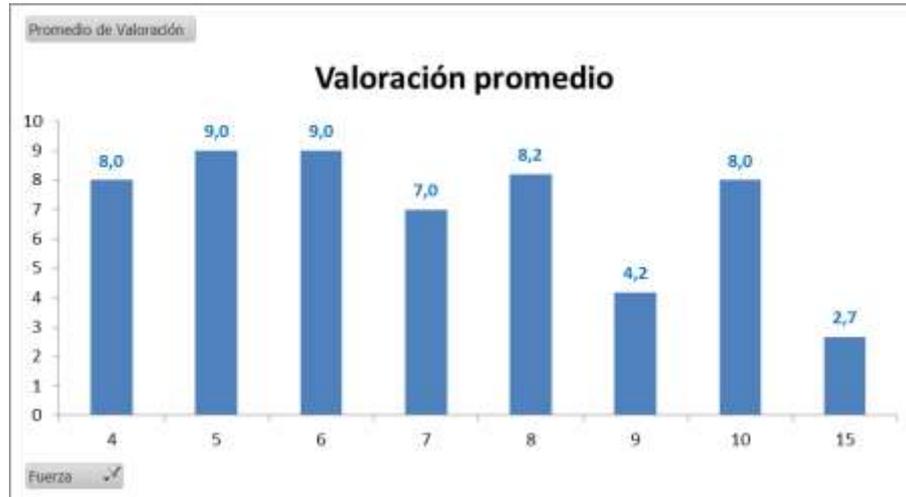
Fuerza propuesta en cada iteración por el algoritmo de aprendizaje por refuerzo.

Fuente: AIDIMME

Con 27 iteraciones propuestas, el número de combinaciones cubiertas es de 8 de las 60 posibles.

A priori, puede parecer que son pocas combinaciones las exploradas, pero con varias de ellas se han obtenido valoraciones del lijado muy positivas. En la siguiente gráfica se muestra la valoración promedio obtenida con cada una de las fuerzas a aplicar por el robot propuestas por el algoritmo.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Valoración promedio de la calidad del lijado en función de la fuerza propuesta.

Fuente: AIDIMME

Se puede comprobar como con una fuerza de lijado en el entorno de 5-6 Newtons se han obtenido las mejores valoraciones. Las valoraciones decaen con fuerzas superiores, excepto con las prueba a 10 Newtons. Éste último resultado (a 10 Newtons) supone una anomalía entre el resto de resultados obtenidos.

Si se analiza la rugosidad medida mediante rugosímetro, nos encontramos con:

- Ra (rugosidad promedio) muy similar en todas las iteraciones.
- Rt (diferencia rugosidad entre picos y valles) también muy similar. La pieza lijada con una fuerza de 10 Newtons presenta el valor mas grande. Esto parece indicar que aunque visualmente la pieza parecía buena, la rugosidad no era adecuada. Por tanto, la valoración subjetiva de la calidad del lijado no debería haber sido tan alta.

Los resultados son similares a los obtenidos por el robot mediante demostración humana. Las pruebas y mediciones realizadas sobre piezas lijadas por un operario experto, dejan una rugosidad Ra en torno a 1 -1'1 micras. En las mejores combinaciones propuestas, el robot consigue alcanzar 1'3 micras, bastante similar al operario.

3.2.4 CONCLUSIONES

A continuación, se exponen las principales conclusiones extraídas a raíz de los experimentos y análisis realizados.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

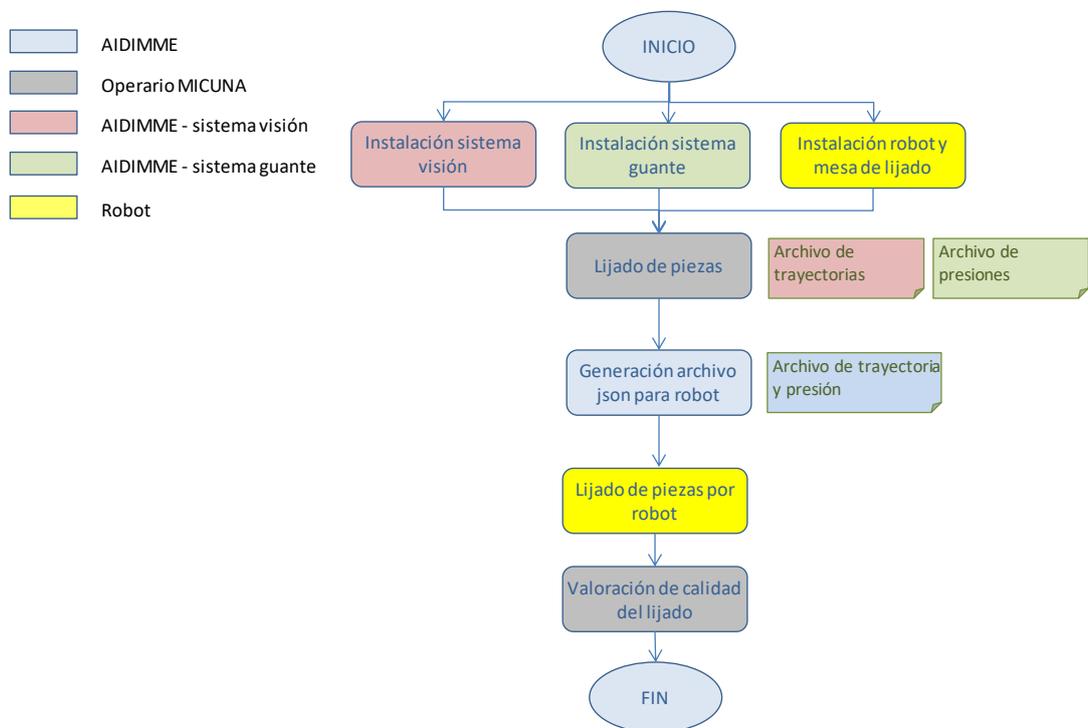
- Mediante el método de aprendizaje desarrollado es posible encontrar una combinación de parámetros de robot (tipo de trayectoria y fuerza a aplicar) que genere un resultado de lijado adecuado, según los estándares de un proceso de fabricación de piezas de mobiliario. Con los resultados obtenidos una combinación adecuada para los parámetros del robot resultaría:
 - Trayectoria: lineal.
 - Fuerza a aplicar: 6 Newtons.
- El método de aprendizaje requiere de un número de iteraciones elevado para poder recorrer diferentes combinaciones, lo que implica tiempo de operario experto en lijado para valorar y medir rugosidades, así como material (en forma de piezas de tablero).
- Para mitigar este problema, debe de revisarse el algoritmo para tratar de minimizar la repetición de combinaciones de fuerza y trayectoria que ya han sido testadas en combinaciones anteriores.
- Los valores numéricos de rugosidad (Ra y Rt) han resultado similares tanto en piezas que visualmente han sido valoradas como buenas, así como en las valoradas como malas. Se plantea la necesidad de que en la función de recompensa del algoritmo de aprendizaje por refuerzo tenga mayor peso la valoración del experto en detrimento de la medición de Ra y Rt.
- La persona que realice la valoración del lijado debe ser verdaderamente experta en procesos de lijado, reflejando la idoneidad de la pieza para pasar a procesos posteriores de pintura o barnizado. Errores o incoherencias en la valoración, pueden hacer al algoritmo de aprendizaje generar resultados erróneos.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

4 DESARROLLO DE PRUEBAS PILOTO

El objetivo de este paquete de trabajo es testar en un entorno industrial los resultados del desarrollo de los dos modelos de aprendizaje objeto del proyecto, para el caso de aplicación (lijado) a partir de las soluciones planteadas anteriormente.

En la siguiente figura, se ha definido un diagrama de flujo con los principales pasos del piloto de aprendizaje por demostración.

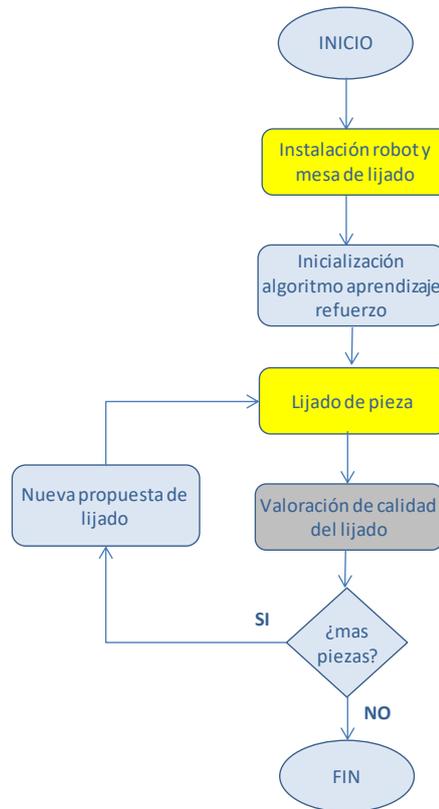
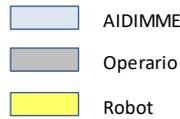


Flujograma del piloto para aprendizaje por demostración

Fuente: AIDIMME.

En la siguiente figura, se ha definido un diagrama de flujo con los principales pasos del piloto de aprendizaje por refuerzo.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Flujograma del piloto para aprendizaje por refuerzo

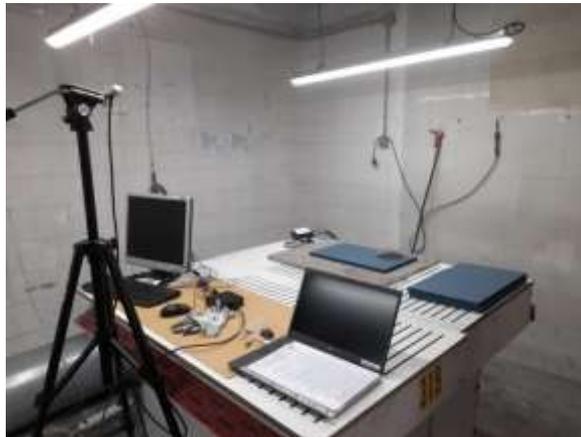
Fuente: AIDIMME.

4.1 PILOTO DE APRENDIZAJE POR DEMOSTRACIÓN

Para el proceso de recopilación de datos se ha empleado un experto en la aplicación de lijado, para que realizara el lijado de piezas de fabricación a fin de capturar las trayectorias que sigue para esa pieza en concreto.

Las piezas empleadas en el piloto son de dimensión 300 x 500mm., con un fondo de color azul aplicado. A fin de obtener los mejores resultados para los datos de trayectorias se ha lijado un lote de 4 piezas en ambas caras.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Montaje de sistema de visión y guante con sensores de presión.

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.



Captura de datos durante el proceso de lijado (i).

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Captura de datos durante el proceso de lijado (ii).

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

Para cada pieza lijada se genera un fichero en bruto con los datos de trayectorias y fuerzas obtenidos, que pueden verse a continuación. Para el caso de la trayectoria de lijado los datos de relevancia son los de la articulación 4 (muñeca derecha).

tiempo	coordenada x	coordenada y	coordenada z	velocidad x	velocidad y	velocidad z	aceleración x	aceleración y	aceleración z	torque	velocidad angular	aceleración angular
18	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
19	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
20	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
21	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
22	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
23	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
24	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
25	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
26	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
27	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
28	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
29	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
30	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
31	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
32	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
33	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
34	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
35	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
36	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
37	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
38	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
39	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
40	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
41	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
42	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
43	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
44	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
45	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
46	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
47	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
48	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
49	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
50	0.01200001	-0.25000000	1.20000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000

Datos en bruto de la trayectoria de la mano que efectuaba el lijado.

Fuente: AIDIMME.

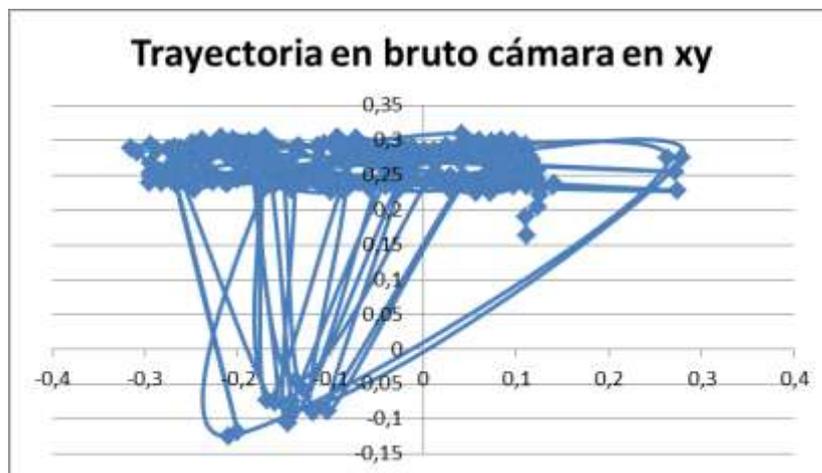
“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Datos en bruto de las presiones de la mano que efectuaba el lijado.

Fuente: AIDIMME.

Los datos en bruto de trayectoria presentan algunos puntos erróneos y están referenciados respecto de un origen de coordenadas propio de la cámara. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de la representación de la trayectoria en bruto capturada con el origen propio de la cámara.

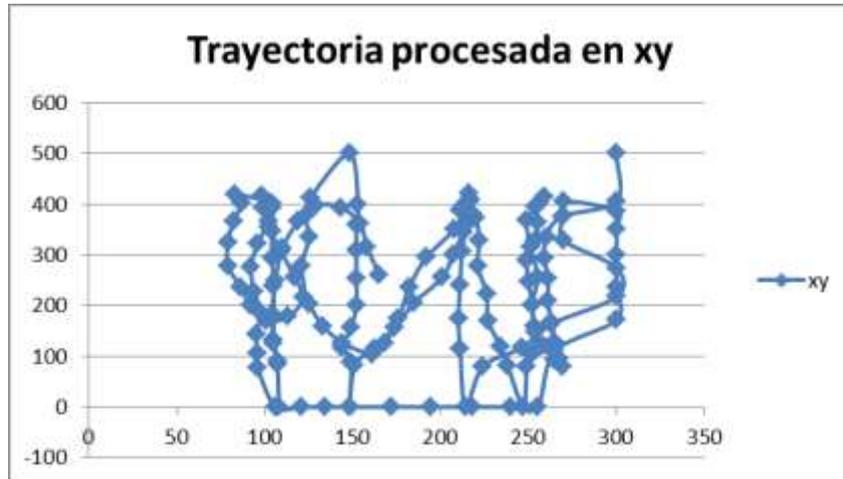


Trayectoria de los datos en bruto capturados por la cámara.

Fuente: AIDIMME.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.

Este archivo se procesa eliminando outliers, cambiando el origen de coordenadas, y suavizando la trayectoria hasta obtener el fichero que da lugar a la trayectoria que se muestra en la siguiente imagen.



Trayectoria del archivo generado para el robot (procesado).

Fuente: AIDIMME.

Con los datos obtenidos para el modelo de aprendizaje por demostración se ha ejecutado la aplicación de lijado con el robot. El procedimiento es el mismo que se ha realizado en el experimento previo, es decir, se han procesado varios lotes de la pieza con los parámetros obtenidos del aprendizaje del operario.

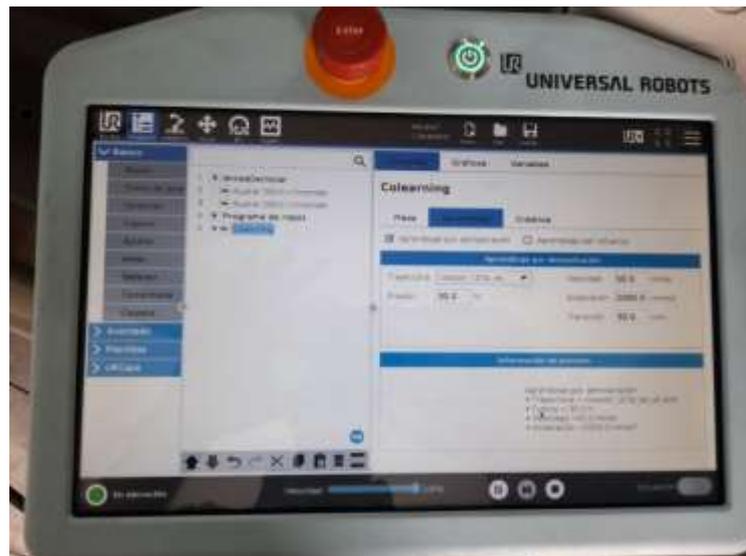
“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Robot listo para lijar una pieza por demostración.

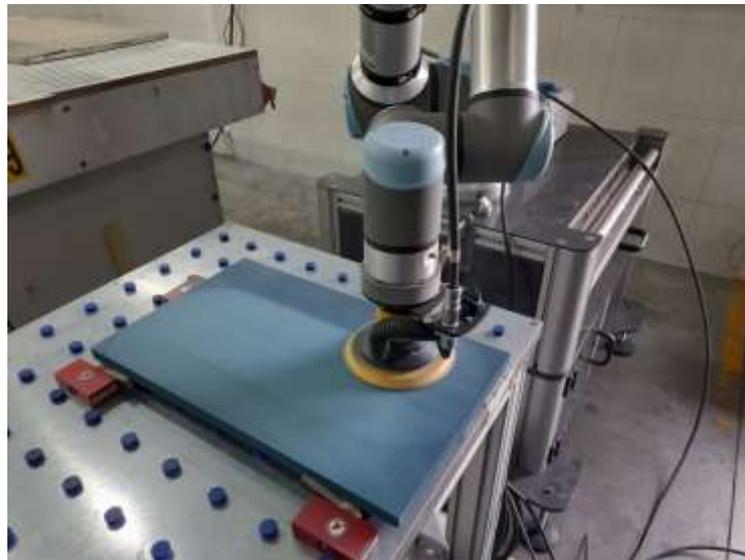
Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

En la URCAP se selecciona el archivo de trayectoria generado anteriormente y se procede a lijar la pieza. Se puede modificar la velocidad del robot y la fuerza aplicada para un mismo archivo de trayectoria, y valorar las diferencias.



Selección del fichero en la URCAP. Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

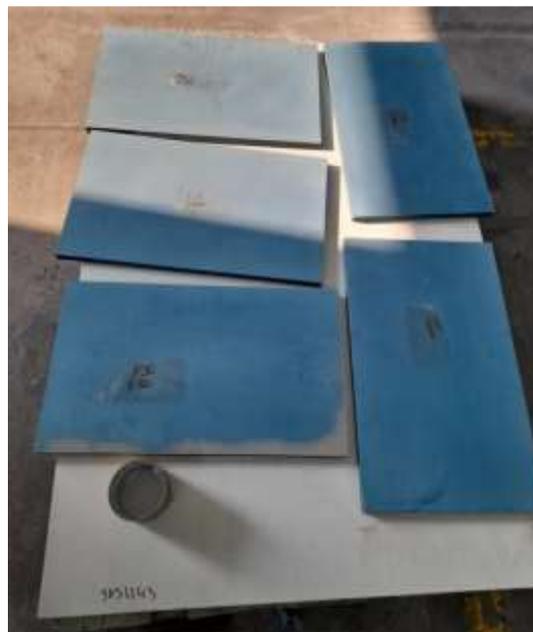
“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Lijado de la pieza por demostración.

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

Las piezas obtenidas mediante este proceso de aprendizaje, se obtienen con unos acabados como el que se muestra a continuación.



Comparación de piezas con el mismo archivo pero diferentes fuerzas y velocidades.

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Ejemplo de pieza lijada por demostración.

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

Al tratarse de un proceso por demostración el sistema está emulando la forma en la que el operario ha realizado el proceso por lo que las piezas obtenidas cumplen con los estándares de acabado definidos por la empresa. Sin embargo, para una misma trayectoria y fuerza, existen diferencias en función de la velocidad de avance del robot.

Para velocidades de avance muy bajas (100-250 m/s) se produce un desgaste excesivo en la pieza. La lija incide demasiado tiempo sobre la misma superficie. Para mitigar este efecto, habría que bajar la fuerza aplicada por debajo de los 10N.

En cambio, si la velocidad es demasiado alta, se generan pequeñas irregularidades que dan lugar a un defecto conocido como “piel de naranja” una vez la pieza ha pasado por lacado.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Ejemplo de pieza donde se ha producido un lijado excesivo.

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.



Ejemplo de pieza donde se puede producir un efecto de piel de naranja tras el barnizado (i).

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Ejemplo de pieza donde se puede producir un efecto de piel de naranja tras el barnizado (ii).

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

El punto óptimo se encuentra a velocidades de 500 m/seg con fuerza comprendida en el rango 10 – 15 Newtons.

4.2 PILOTO DE APRENDIZAJE POR REFUERZO.

Para el aprendizaje por refuerzo no se requiere de preparación de elementos de captura de datos. Solo la puesta a punto de robot y mesa de lijado, llevada a cabo durante el aprendizaje por demostración.

Se ha inicializado el algoritmo de aprendizaje para tener la primera iteración (combinación de tipo de trayectoria de lijado y fuerza). De esta forma, se han ido procesando una serie de piezas a las que al finalizar el lijado se les ha dado una valoración de acabado superficial del 0 al 10 por parte del experto de Micuna. Y a las que se les ha medido el valor de rugosidad en puntos concretos.

Las valoraciones de acabado y rugosidad han ido alimentando al sistema en la búsqueda de la mejor combinación de parámetros. Este ha enviado las distintas iteraciones en función de dichos resultados.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo
Resumen de resultados.



Lijado de una pieza mediante el aprendizaje por refuerzo (i).

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.



Pantalla para la valoración de las piezas en la URCAP

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

“COLARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

Algunas de las piezas obtenidas en el proceso de aprendizaje, son las que se muestran a continuación.



Piezas lijadas durante el proceso de aprendizaje por refuerzo.

Fuente: AIDIMME en las instalaciones de Micuna.

El operario ha valorado mejor las piezas procesadas con una trayectoria de tipo “lineal” y una fuerza comprendida en el rango 8-12 Newtons. Con una trayectoria de tipo “orbital” también se han generado piezas catalogadas como válidas con presiones algo mas bajas (6-8 Newtons). Es éste tipo de trayectoria se realizan mas pasadas sobre la pieza y por ello, la presión debe ser menor.

4.3 CONCLUSIONES

Mediante el método de aprendizaje por demostración se ha conseguido generar un programa de lijado de robot, mediante la imitación del trabajo realizado por un operario.

La trayectoria de lijado imita la trayectoria real del operario realizando la operación; la fuerza del robot es proporcional a la aplicada por el operario; la velocidad de lijado se puede ajustar para lograr un acabado adecuado, así como un tiempo de ciclo de la tarea competitivo.

Los puntos a favor del método de aprendizaje que durante el piloto se han valorado son:

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

- Rapidez. En 10 minutos se puede tener un programa de lijado listo para una nueva pieza.
- Flexibilidad. El programa de lijado inicial puede ser modificado rápidamente desde la URCAP en los parámetros de velocidad y fuerza.
- Eficacia. Se consigue obtener piezas con un acabado óptimo.
- Adaptable a cualquier tipo de pieza plana, dentro del rango de dimensiones del brazo robot.

Los puntos negativos que durante el piloto se han identificado son:

- Implicación de varios equipos (hardware) en la preparación previa. Hay que preparar el equipo de visión y el guante de captura de datos.
- Requiere de un entorno libre de otras personas para capturar los datos en bruto de la trayectoria.
- No está automatizado completamente la generación del archivo final que se traslada al robot a partir de los datos capturados.
- El sistema de captación de trayectorias genera el archivo tomando como referencia la articulación de la muñeca del operario con lo que se genera un pequeño desfase con respecto a la trayectoria real de la lijadora.
- Asimismo, este sistema, toma la imagen con perspectiva respecto de la pieza con lo que se genera una deformación geométrica de la pieza, lo que obliga a realizar ajustes de los puntos de la trayectoria.

Mediante el método de aprendizaje por refuerzo se ha conseguido generar un programa de lijado de robot, mediante la iteración de diferentes combinaciones de fuerza y tipos de trayectoria. Los tres tipos de trayectoria vienen predefinidos y son: lineal, orbital y espiral.

Los puntos a favor del método de aprendizaje que durante el piloto se han valorado son:

- Preparación previa mínima. No requiere de preparación de elementos de captura de datos. En cuanto está listo el plano de trabajo y el origen de coordenadas se puede empezar.
- Se puede trabajar en cualquier tipo de entorno, aunque haya mas personas cerca.
- Todo el proceso está automatizado.

Los puntos negativos que durante el piloto se han identificado son:

- Lentitud. Para alcanzar la combinación óptima el método requiere de muchas iteraciones (lijado de pieza, mas valoración cualitativa y cuantitativa), pudiendo llegar a costar 1h hasta alcanzar piezas correctas. El algoritmo en su proceso de búsqueda de opciones válidas repite combinaciones propuestas ya en iteraciones anteriores, lo que dilata el proceso.

“COLEARNING” – Desarrollo de técnicas de aprendizaje de tareas para cobots basadas en interacción humana y algoritmos de aprendizaje de refuerzo

Resumen de resultados.

- Gasto importante de piezas para el aprendizaje, como consecuencia del número de iteraciones requerida.
- No existe un criterio de parada. Es el usuario el que debe de, dentro del proceso de aprendizaje, identificar el momento de para del proceso debido a que ya ha identificado piezas válidas en iteraciones anteriores. Si el usuario no está concentrado en el proceso, puede dilatar en exceso el mismo.
- Solo válida para piezas rectangulares o cuadradas.