

## Control híbrido para la manipulación robótica de elementos flexibles

Tapia Sal Paz, B.<sup>a,\*</sup>, Sorrosal, G.<sup>a</sup>, Mancisidor, A.<sup>b</sup>, Cabanes, I.<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Ikerlan, Centro tecnológico de investigación, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), 20500 Arrasate, España.

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV-EHU), 48013, Bilbao, España.

**To cite this article:** Tapia Sal Paz, Benjamín., Sorrosal, Gorka., Mancisidor, Aitziber., Cabanes Itziar. 2023. Hybrid robotic control for flexible element manipulation. XLIV Jornadas de Automática, 768-772.  
<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.768>

### Resumen

En este trabajo se presenta la propuesta de control de un brazo robótico para la manipulación de elementos flexibles. Con esta, se busca una solución de control para trayectorias de manipulación de elementos flexibles donde es necesaria la aplicación de una fuerza adecuada que asegure la integridad física del elemento manipulado. La propuesta consiste en un esquema híbrido para el control de la interacción entre el robot y su entorno, proponiendo la generación de una trayectoria teórica de referencia y su adaptación mediante un controlador de fuerza que actúa de acuerdo a las fuerzas presentes durante la ejecución de la tarea. La implementación del control se realiza utilizando el framework hybrid-planning de ROS2, la cual es validada en un entorno de simulación en los robots Franka Emika y KUKA lbr iiwa. Como resultado se consiguen trayectorias para la manipulación de elementos flexibles que reducen la fuerza aplicada sobre el elemento flexible.

*Palabras clave:* control de fuerza, planificación híbrida, ROS2, control de interacción, robótica

### Hybrid robotic control for flexible element manipulation

#### Abstract

In this work, the control proposal of a robotic arm for the manipulation of flexible elements is presented. With this, a control solution is sought for handling paths of flexible elements where the application of an adequate force is necessary to ensure the physical integrity of the manipulated element. The proposal consists of a hybrid scheme for the control of the interaction between the robot's element terminal and its environment, where the generation of a theoretical trajectory is proposed and its adaptation with a force controller, which acts according to the forces present during the execution of the task. The implementation of the control use the ROS2 hybrid-planning framework, which is validated in a simulation environment in the Franka Emika and KUKA lbr iiwa robots. As a result, paths for the manipulation of flexible elements are achieved, which reduce the force applied on the flexible element.

*Keywords:* force control, hybrid planning, ROS2, interaction control, robotic

### 1. Introducción

Gran variedad de tareas en donde se utilizan brazos robóticos requieren la interacción entre este y su entorno. Para cumplir con los requerimientos dispuestos por esa interacción es necesario controlar tanto la fuerza como la posición Song et al. (2019). Operaciones de mecanizado, ensamble y desensamblaje, son ejemplos de este tipo de tareas He et al. (2007); Chen and

Liu (2013); Sornmo et al. (2012). Requerimientos de fuerzas comunes en estas tareas van desde ejercer una fuerza determinada, a sólo ejercer la fuerza necesaria para mantener el contacto en la geometría del entorno.

Para cumplir estos requerimientos de interacción diversas metodologías de control son utilizadas en brazos robóticos Whitney (1987). Las diferencias entre las distintas metodologías recae principalmente en la determinación de las fuerzas

\*Autor para correspondencia: [btapia@ikerlan.es](mailto:btapia@ikerlan.es)  
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)



(a) Tarea de extracción de un elemento flexible de la puerta de un refrigerador de forma manual (b) Propuesta de validación para la tarea de extracción de elementos flexibles de forma automática

Figura 1: Tarea de referencia y arreglo de validación

de interacción, y en como distintos tipos de señales de realimentación son incorporadas para lograr el control tanto de fuerza como de posición para garantizar la interacción buscada.

Controladores de impedancia Hogan (1984) y controladores híbridos Mason (1981) son las metodologías más utilizadas para el control de tareas de interacción robótica. En los primeros, el establecimiento de una relación entre la posición y fuerza genera un comportamiento de masa-resorte-amortiguador. Por otro lado, en los controladores híbridos el control de posición y fuerza trabajan de manera paralela, generando así espacios ortogonales de control. Los principales desafíos en estos controladores están relacionados al gran trabajo de diseño y ajuste en los parámetros que garantizan la interacción deseada. Así también, la obtención de movimientos suaves y continuos durante la ejecución de la tarea debe ser garantizada y es objeto de estudio.

Frente a estos desafíos en este trabajo se propone un control híbrido robótico para la ejecución de tareas en donde es necesaria la manipulación de elementos flexibles. Con este control se generan trayectorias de manipulación garantizando la aplicación de una adecuada fuerza sobre el elemento manipulado.

En la sección 2 se introduce la tarea de manipulación de elementos flexibles, presentando los principales desafíos que surgen al realizar este tipo de tareas con un sistema robótico. Para ello, al final de la sección se presenta la propuesta de control para este tipo de tareas, validando la misma en un entorno simulado. En las secciones 3 y 4 se analizan los resultados obtenidos, y se introduce la propuesta de control como un primer paso hacia un sistema robótico inteligente.

## 2. Manipulación robótica de elementos flexibles

Tareas de manipulación de elementos flexibles presentan características en donde se requiere el control en la interacción del elemento terminal del robot y el elemento flexible, para garantizar tanto la ejecución de la tarea como para resguardar la integridad física del elemento flexible.

Algunos desafíos que se presentan cuando se trabaja con estos tipos de tareas, son las fuerzas de interacción que aparecen durante la ejecución. Estas fuerzas son dinámicas y varían de acuerdo al estado y características del elemento flexible específico que se manipula. Las mismas influyen en el desarrollo de la tarea por lo que se debe contar con la capacidad de identificarlas para lograr el correcto control de interacción.

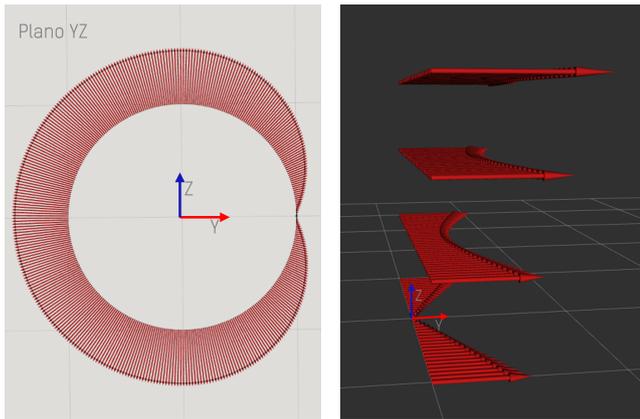
Esta característica, en donde el robot debe ser capaz de medir las fuerzas y a partir de ellas tomar acciones de control en tiempo de ejecución, provoca que en la actualidad este tipo de tareas se desarrollen en mayor medida de manera manual.

Para lograr un sistema robótico capaz de llevar a cabo este tipo de tareas, en este trabajo se propone un control híbrido que permite enfrentar esos desafíos.

### 2.1. Caso de uso

Dentro de las tareas comprendidas en la manipulación de elementos flexibles, la extracción de estos es de nuestro interés. Este tipo de tarea se encuentra presente en diversos ámbitos industriales, en los que se puede destacar el desensamblaje y reutilización de elementos flexibles utilizados para sellamiento en puertas de electrodomésticos, automóviles, entre otros artefactos.

En la figura 1(a), se puede observar la tarea de extracción de uno de estos elementos en la puerta de un refrigerador. En esta tarea, el elemento flexible debe ser desprendido de su sujeción en el marco de la puerta garantizando su integridad física para una futura reutilización. Por lo que, el objetivo de la tarea consiste en la ejecución de una trayectoria de extracción que garantice la aplicación de una fuerza adecuada para el elemento flexible. Tanto la planificación de una trayectoria, como la determinación de una fuerza determinada presentan un desafío. Esto se debe a las diferentes condiciones que se presentan entre distintos casos. De acuerdo al punto de agarre del elemento flexible diferentes trayectorias de extracción son adecuadas. Así también la condición del elemento flexible varía entre los casos requiriendo distintas aplicaciones de fuerzas.



(a) Distribución de fuerzas debido a la reacción del soporte sobre el elemento flexible  
(b) Distribución espacial total de fuerzas sobre el elemento flexible

Figura 2: Simulación de fuerzas en el entorno simulado

## 2.2. Entorno de simulación

Para representar la tarea de extracción de elementos flexibles y poder validar la propuesta de control, en este trabajo se ha desarrollado un entorno de simulación. El objetivo de este entorno consiste en poder generar las trayectorias de extracción simulando la interacción de fuerzas que se generan en la ejecución de la misma.

En la figura 1(b) se muestra el arreglo diseñado para poder representar cualitativamente el comportamiento producido en un punto de sujeción del elemento flexible. Con el mismo se busca replicar las diferentes situaciones que se presentan en la extracción del elemento flexible, pudiendo así replicar las diferentes situaciones presentes en distintos puntos de agarre.

Para la simulación de las fuerzas actuantes durante la ejecución de la tarea, se tuvieron en cuenta dos aportaciones. Por un lado, la fuerza de reacción del soporte sobre el elemento flexible, y por otro lado, la fuerza elástica del elemento flexible. En la figura 2(a) se representan las fuerzas de reacción producto del soporte sobre el elemento flexible. Estas fuerzas fueron obtenidas con el uso del modelo presentado en (1), el cual proporciona un estado de fuerzas en el cual se presenta un mínimo de fuerzas en la dirección por donde el elemento flexible debe ser extraído, que corresponde con el grado de libertad del elemento flexible en el soporte.

$$\begin{cases} \text{if } \alpha > 90 \wedge \alpha < 180 \rightarrow F_{\text{soporte}} = d * K_{\text{elastica}} \\ \text{else } \rightarrow F_{\text{soporte}} = \|\sin(\alpha) * d * K_{\text{elastica}}\| \end{cases} \quad (1)$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo medido desde el eje Y hacia el eje Z,  $K_{\text{elastica}}$  la constante elástica del elemento flexible, y  $d$  la distancia entre el soporte y el elemento terminal del robot.

Para la componente de fuerza debida a la fuerza elástica del material, se propone un modelo de resorte (2).

$$F_{\text{elastica}} = K_{\text{elastica}} * \text{Desplazamiento} \quad (2)$$

Siendo la fuerza elástica proporcional a la constante elástica del material  $K_{\text{elastica}}$  y al desplazamiento del elemento terminal respecto a un punto en el espacio donde se considera que el elemento flexible se encuentra en el estado de reposo del modelo ( $\text{Desplazamiento} = 0 \rightarrow F_{\text{elastica}} = 0$ ).

En la figura 2, se muestra la distribución espacial de la combinación de fuerzas sobre el elemento flexible, teniendo en cuenta cinco posiciones diferentes del punto de sujeción.

Esta implementación del entorno simulado, se realiza sobre los brazos robóticos Franka Emika y KUKA LBR iiwa.

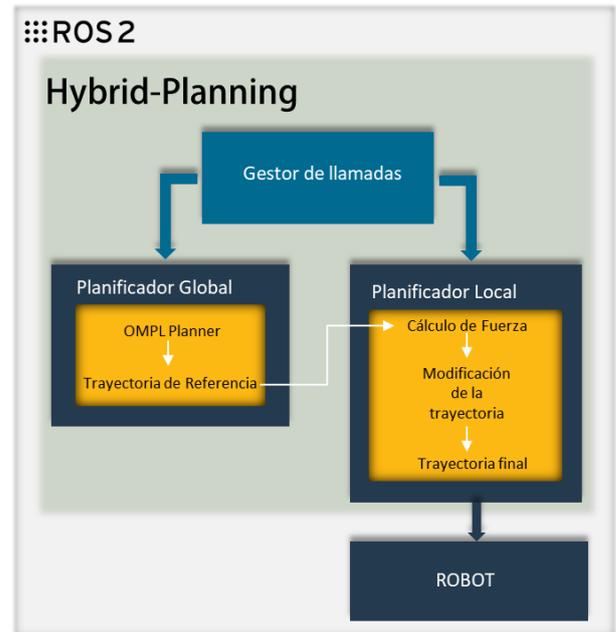


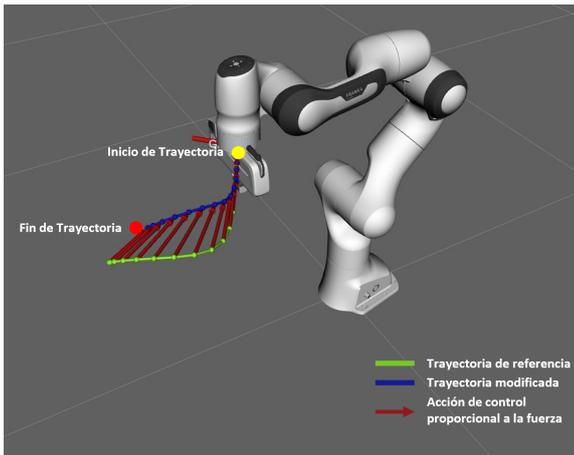
Figura 3: Control de fuerza híbrido utilizando el framework hybrid-planning

## 2.3. Control de fuerza híbrido

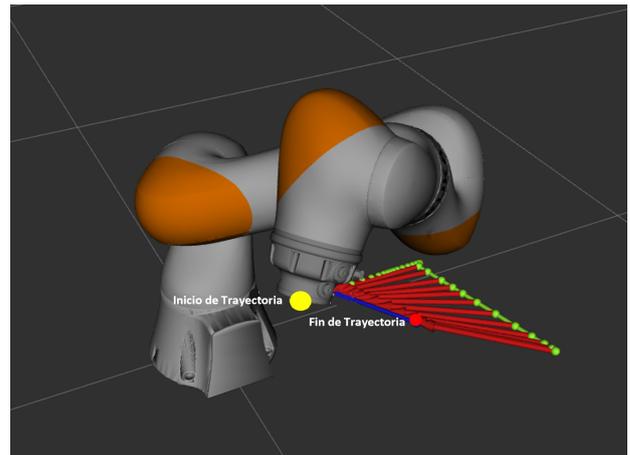
Para los desafíos presentes en tareas de la manipulación de elementos flexibles presentados en la sección 2.1 se presenta un control híbrido de fuerza, el cual se basa en el establecimiento de una trayectoria de referencia la cual será modificada por un controlador de fuerza teniendo en cuenta la interacción del sistema en tiempo de ejecución.

El control propuesto se desarrolla sobre el framework ROS2, en donde se hace uso del framework hybrid-planning de MoveIt Coleman et al. (2014). Con este framework se busca mejorar las prestaciones que ofrecen otros frameworks basados en la metodología "sensor-planear-actuar". Para tareas en donde el entorno y los requerimientos cambian de manera dinámica durante la ejecución dichas metodologías no son adecuadas. Esto se debe a que en tareas de interacción, el entorno puede haber cambiado desde el planeamiento hasta la ejecución. Por este motivo, se debe migrar a metodologías en donde la acción esta vinculada en tiempo real con el sensado Beltran-Hernandez et al. (2020).

La manera en la que este framework ataca esta problemática es mediante el uso de planificadores globales y locales. Estos planificadores tienen diferentes funciones y trabajan a frecuencias distintas. En el caso del planificador global, este se encarga de resolver el problema global en donde no existen requerimientos de tiempo real. Por otro lado, el planificador local se encarga de adaptar la solución del planificador global teniendo en cuenta sensores y problemas más complejos que necesiten garantía de tiempo real. Por ese motivo, el planificador local se ejecuta a una frecuencia mayor que la del planificador global, y es el encargado de enviar los comandos al robot. Por último, se



(a) Resultado de la generación de trayectorias sobre robot Franka Emika



(b) Resultado de la generación de trayectorias cartesianas sobre robot KUKA iiwa

Figura 4: Resultado de trayectorias utilizando la metodología de control propuesta

encuentra un elemento gestor que se encarga de coordinar las llamadas al planificador global y local.

La implementación de la propuesta de control haciendo uso del framework hybrid-planning se muestra en la figura 3. La generación de la trayectoria de referencia es realizada por el planificador global haciendo uso del planificador Open Motion Planning Library (OMPL) Şucan et al. (2012). Esta trayectoria es tomada por el planificador local para ser modificada y ejecutada. La trayectoria de referencia está constituida por waypoints, los cuales son modificados de acuerdo a la fuerza actuante en dicho punto durante la ejecución. Esta modificación toma en cuenta la fuerza presente mediante un control de fuerza proporcional. Finalmente, el planificador local también es el encargado de enviar esta trayectoria modificada a la controladora del robot.

Para coordinar las llamadas a los planificadores globales y locales, en este trabajo la lógica del gestor consiste en llamar al planificador global al comienzo de la tarea para generar así la trayectoria teórica de referencia. Luego el planificador local se encarga de determinar las fuerzas actuantes de la tarea, para así modificar esta trayectoria y enviarla al robot para su ejecución.

### 3. Análisis de resultados

La implementación del control propuesto se realiza sobre los brazos robóticos Franka emika y KUKA Ibr iiwa, Obteniendo como resultado las trayectorias que se presentan en la figura 4.

Para la generación de las trayectorias de referencia se estableció un punto arbitrario de inicio de la trayectoria. Este punto de inicio corresponde al punto en donde el elemento flexible se encuentra sujetado por el soporte. Así también, la posición de fin de la trayectoria se seleccionó para obtener trayectorias similares a las ejecutadas en aplicaciones reales (Figura 1(b)). En el caso del robot Franka Emika (figura 4(a)), no se especifica al planificador ningún requerimiento. Por otro lado para el robot KUKA iiwa (figura 4(b)), se especifica al planificador la generación de trayectorias cartesianas. De esta manera se busca evaluar la propuesta para diferentes tipos de trayectorias.

Las trayectorias de referencia generadas por el planificador global (trayectorias verdes) corresponden a trayectorias de extracción teóricas, pero estas no tienen en cuenta las fuerzas de interacción presentes durante su ejecución. Una vez que comienza la ejecución del movimiento del robot, el planificador local obtiene la fuerza presente y desvía la trayectoria acorde a esta. Esta modificación es representada por las flechas rojas que corresponden a la acción proporcional del control de fuerza. De esa manera, se obtiene la trayectoria modificada (trayectoria azul) la cual es enviada al robot para su ejecución.

Como resultado la trayectoria modificada resulta en una trayectoria que realiza la tarea de extracción del elemento flexible, resguardando la integridad del mismo.

### 4. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se presenta la implementación de un control robótico para la manipulación de elementos flexibles. Se propone un control híbrido para la adaptación de trayectorias de acuerdo a las fuerzas de interacción presentes durante la ejecución de la misma. Para la implementación de este control, se hace uso del framework hybrid-planning de ROS2.

Como resultado, se obtienen trayectorias suaves y continuas que son adecuadas para la manipulación de elementos flexibles. El uso del planificador global permite la especificación de trayectorias de referencias al inicio de la tarea. El uso del planificador local permite la modificación durante la ejecución de la tarea del controlador de fuerza, que adapta esa trayectoria de referencia a otra en la que se ejerza menos fuerza sobre el elemento flexible.

Se escogió implementar la propuesta en un entorno de simulación para la evaluación del uso del framework hybrid-planning. El próximo paso de esta propuesta consiste en trasladar esta implementación al mundo real y trabajar sobre el robot KUKA Ibr iiwa. De esta manera se trabajaran con las fuerzas reales obtenidas en tiempo real mediante los sensores del robot.

En la figura 5 se muestra como la propuesta de control presentada en este trabajo servirá como base de un sistema robótico

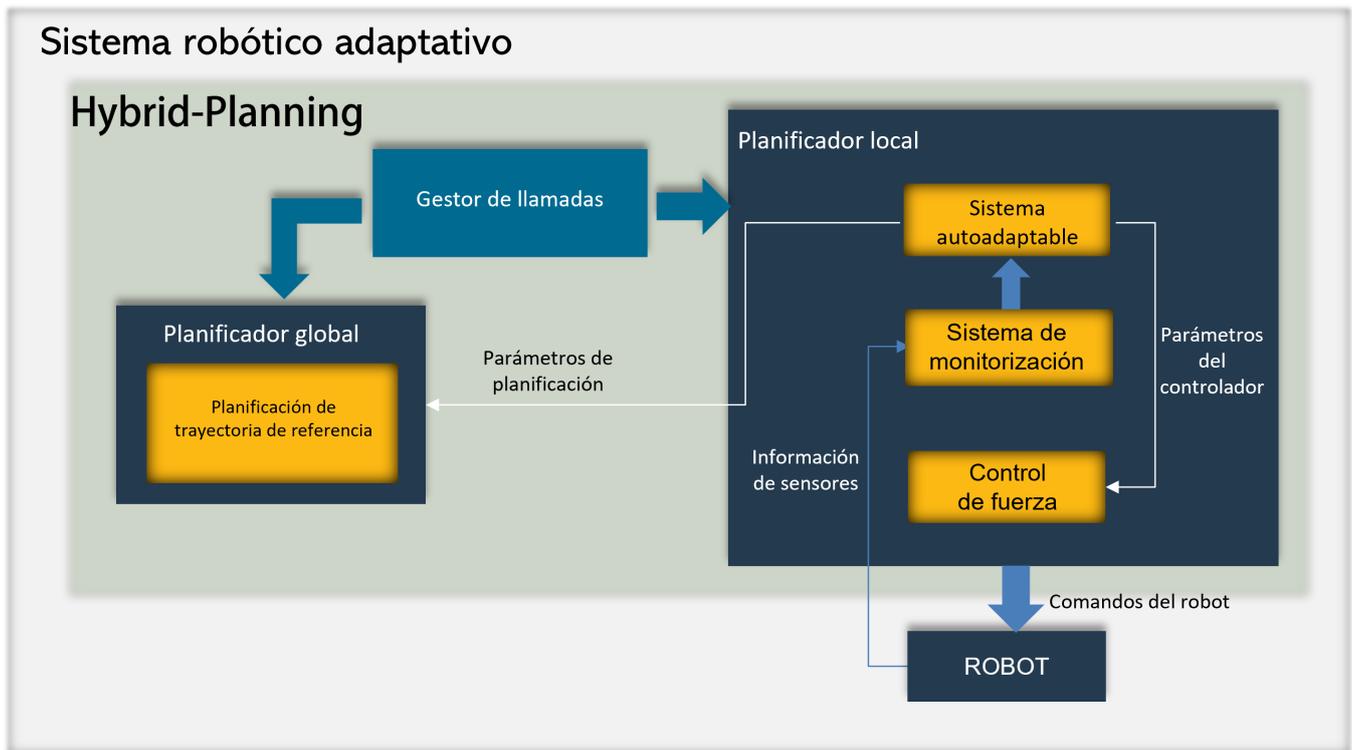


Figura 5: Arquitectura de sistema robótico autoadaptativo.

de auto-adaptación para tareas de interacción. El uso del framework hybrid-planning del controlador nos permite la incorporación de otros sistemas dentro del planificador local, permitiéndonos así, trabajar en tiempo real durante la ejecución de la tarea. La incorporación de un sistema de monitorización y de un sistema de adaptación, permitirá incrementar la flexibilidad y autonomía del sistema. El uso de información de sensores del robot en el sistema de monitorización, permitirá el conocimiento de estados significativos acerca de la interacción en la ejecución de la tarea. Esta información, servirá para que el sistema de adaptación tome acciones de control. Para ello, se planea la utilización de técnicas de aprendizaje por refuerzo Sutton and Barto (2018), en donde el sistema tomará acciones en el controlador de fuerza y sobre el movimiento del robot. Con esto se mejorará el actual control de fuerza proporcional que solo tiene en cuenta la fuerza actual y toma una acción de control proporcional a esta. Migrando así a un control de fuerza que especifica un objetivo de fuerza de acuerdo al estado actual de la tarea y del elemento específico que se manipula.

De esa manera, se contará con un sistema robótico autónomo para el uso en tareas de manipulación de elementos flexibles.

### Agradecimientos

Este trabajo es realizado gracias a la ayuda del programa de investigación y innovación Horizon 2020 de la Unión Europea, bajo el acuerdo de beca Marie Skłodowska-Curie No 955681 y por miembros del grupo de investigación de Sensorización Virtual de la Universidad del País Vasco (Basque Government Ref.

IT1726-22).

### Referencias

- Beltran-Hernandez, C. C., Petit, D., Ramirez-Alpizar, I. G., Harada, K., 10 2020. Variable compliance control for robotic peg-in-hole assembly: A deep-reinforcement-learning approach. *Applied Sciences (Switzerland)* 10, 1–17.  
DOI: 10.3390/app10196923
- Chen, H., Liu, Y., 4 2013. Robotic assembly automation using robust compliant control. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29, 293–300.  
DOI: 10.1016/j.rcim.2012.09.001
- Coleman, D., Sucan, I., Chitta, S., Correll, N., 4 2014. Reducing the barrier to entry of complex robotic software: a moveit! case study.  
URL: <http://arxiv.org/abs/1404.3785>
- He, J., zengxi pan, Zhang, H., 2007. Adaptive force control for robotic machining process.
- Hogan, N., 1984. Impedance control: An approach to manipulation. In: 1984 American control conference. IEEE, pp. 304–313.
- Mason, M. T., 1981. Compliance and force control for computer controlled manipulators. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 11, 418–432.  
DOI: 10.1109/TSMC.1981.4308708
- Song, P., Yu, Y., Zhang, X., 5 2019. A tutorial survey and comparison of impedance control on robotic manipulation. *Robotica* 37, 801–836.  
DOI: 10.1017/S0263574718001339
- Sornmo, O., Robertsson, A., Wanner, A., 2012. Force controlled knife-grinding with industrial robot. pp. 1356–1361.  
DOI: 10.1109/CCA.2012.6402362
- Şucan, I. A., Moll, M., Kavraki, L. E., December 2012. The Open Motion Planning Library. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19 (4), 72–82.  
DOI: 10.1109/MRA.2012.2205651
- Sutton, R. S., Barto, A. G., 2018. Reinforcement learning : an introduction, second edition Edition. The MIT Press.
- Whitney, D. E., 1987. Historical perspective and state of the art in robot force control. *The International Journal of Robotics Research* 6 (1), 3–14.