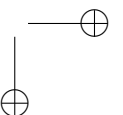
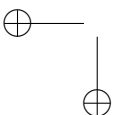


Resumen

Los robots paralelos (PR por sus siglas en ingles) son mecanismos donde el efector final está unido a la base o plataforma fija, mediante al menos dos cadenas cinemáticas abiertas. La arquitectura de cadenas cerradas dota a los PR de una gran capacidad de carga y alta precisión, lo que los hace adecuados para diversas aplicaciones, entre ellas la interacción persona-robot. En cambio, el principal inconveniente de un PR no redundante es la presencia de singularidades dentro del espacio de trabajo (singularidades Tipo II). En las proximidades de una singularidad Tipo II, un PR no redundante pierde el control sobre los movimientos del efector final. La pérdida de control representa un riesgo importante para los usuarios, especialmente en la rehabilitación robótica. En las últimas décadas, los PR se han popularizado en la rehabilitación de miembros inferiores debido al aumento del número de personas que viven con limitaciones físicas, asociadas principalmente al envejecimiento de la población mundial. Así, esta tesis trata sobre la detección y evitación de singularidades de Tipo II para asegurar total control de un PR no redundante desarrollado para la rehabilitación y diagnóstico de la rodilla, denominado 3UPS+RPU por su arquitectura.

En la literatura, existen varios índices para detectar y medir la cercanía a una singularidad basados en métodos analíticos y geométricos. Sin embargo, algunos de estos índices carecen de significado físico y son incapaces de identificar los actuadores responsables de la pérdida de control. La primera contribución de esta tesis es el desarrollo de dos novedosos índices para detectar y medir la proximidad a una singularidad de Tipo II, capaces de identificar el par de actuadores responsables de la singularidad. Los dos índices son los ángulos en-



tre los componentes lineal ($\Theta_{i,j}$) y angular ($\Omega_{i,j}$) de dos Twist Screw de Salida (OTS por sus siglas en ingles) normalizados i, j . Un OTS normalizado representa la dirección del movimiento impuesto por un actuador al efector final, considerando que los demás actuadores están bloqueados. Una singularidad Tipo II es detectada cuando $\Theta_{i,j} = \Omega_{i,j} = 0$ y su proximidad se mide mediante los mínimos ángulos $\Theta_{i,j}$ ($min\Theta$) y $\Omega_{i,j}$ ($min\Omega$) para los casos plano y espacial, respectivamente. La eficacia de los índices $\Theta_{i,j}$ y $\Omega_{i,j}$ se evalúa de forma teórica y experimental. Los casos de estudio son el robot $3\underline{UPS}+\underline{RPU}$ y un mecanismo de cinco barras. En la misma línea, se propone un procedimiento experimental para el adecuado establecimiento del límite de cercanía a una singularidad de Tipo II. El límite de proximidad a la singularidad de un índice arbitrario se establece mediante la aproximación progresiva del PR a una singularidad y la medición de la última posición controlable.

Posteriormente, se desarrollan dos nuevos algoritmos deterministas para liberar y evitar una singularidad de Tipo II basados en $min\Theta$ y $min\Omega$ para PR no redundantes. $min\Theta$ y $min\Omega$ se utilizan para identificar los dos actuadores a mover para liberar o evitar el PR de una singularidad. Estos algoritmos requieren una medición precisa de la pose alcanzada por el efector final y la pose de referencia para los actuadores. Los algoritmos de liberación y evasión se establecen mediante el tiempo de muestreo del controlador y la velocidad de trabajo media del robot. El algoritmo para liberar un PR de una configuración singular se aplica con éxito en un controlador híbrido basado en visión artificial para el PR $3\underline{UPS}+\underline{RPU}$. El controlador híbrido utiliza un sistema de fotogrametría para medir la pose del robot debido a la degeneración del modelo cinemático en las proximidades de una singularidad. El algoritmo de evitación de Tipo II se aplica a la planificación de trayectorias offline y online con singularidad libre para un mecanismo de cinco barras y el PR $3\underline{UPS}+\underline{RPU}$. Estas aplicaciones verifican el bajo coste computacional y la mínima desviación introducida en la trayectoria original por los nuevos algoritmos.

La implementación directa de un controlador de fuerza/posición en el PR $3\underline{UPS}+\underline{RPU}$ es insegura porque el paciente podría llevar involuntariamente al PR a una singularidad. Por lo tanto, esta tesis concluye presentando un novedoso controlador de fuerza/posición complementado con el algoritmo de evitación de singularidades de Tipo II. El nuevo controlador se evalúa durante rehabilitación activa de una pierna de maniquí y una pierna humana no lesionada. Los resultados muestran que el nuevo controlador combinado mantiene el PR $3\underline{UPS}+\underline{RPU}$ lejos de configuraciones singulares con una desviación mínima de la trayectoria original. Por lo tanto, esta tesis habilita el $3\underline{UPS}+\underline{RPU}$ PR para la rehabilitación segura de miembros inferiores lesionados.