

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción general . . . . .	1
1.2	Estado del arte . . . . .	2
1.2.1	Robots industriales . . . . .	2
1.2.2	Manipulador Robótico SCARA . . . . .	4
1.2.3	Métodos de obtención de posición en el plano cartesiano . . . . .	5
1.2.4	Procesamiento digital de imágenes . . . . .	7
1.2.5	Discusión . . . . .	14
1.3	Objetivos . . . . .	14
1.3.1	Objetivo general . . . . .	14
1.3.2	Objetivos específicos . . . . .	14
1.4	Alcances y limitaciones . . . . .	15
1.4.1	Alcances . . . . .	15
1.4.2	Limitaciones . . . . .	15
1.5	Metodología . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Diseño y construcción del manipulador SCARA</b>	<b>17</b>
2.1	Introducción . . . . .	17
2.2	Diseño del manipulador . . . . .	17
2.2.1	Cálculo de correas de transmisión . . . . .	18
2.2.2	Cálculo de ejes de transmisión . . . . .	19
2.2.3	Selección de componentes . . . . .	28
2.2.4	Análisis de cargas manipulador SCARA . . . . .	30
2.3	Construcción del manipulador SCARA . . . . .	32
2.3.1	Construcción estructura del manipulador . . . . .	32
2.3.2	Construcción electroimán . . . . .	34
2.4	Conexión eléctrico . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Modelo cinemático y dinámico de manipulador SCARA de 4 grados de libertad</b>	<b>40</b>
3.1	Introducción . . . . .	40
3.2	Modelos cinemáticos del manipulador SCARA de 4 grados de libertad . . . . .	40
3.2.1	Modelo Cinemático Directo . . . . .	40
3.2.2	Modelo cinemático inverso . . . . .	47
3.3	Modelo Dinámico del manipulador SCARA de 4 grados de libertad . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Control de posición manipulador SCARA</b>	<b>58</b>
4.1	Introducción . . . . .	58
4.2	Procesamiento digital de imágenes . . . . .	58
4.3	Generador de trayectorias . . . . .	69
4.4	Pruebas de comunicación entre procesamiento digital de imágenes y generador de trayectoria . . . . .	76
<b>5</b>	<b>Resultados experimentales</b>	<b>78</b>

5.1	Introducción . . . . .	78
5.2	Pruebas de posicionamiento, mediante la obtención de coordenadas con procesamiento digital de imágenes. . . . .	78
5.3	Realización de rutinas con el manipulador SCARA . . . . .	81
5.4	Análisis de resultados obtenidos . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>94</b>
6.1	Introducción . . . . .	94
6.2	Conclusiones . . . . .	94
6.3	Trabajos futuros . . . . .	95
	<b>Referencias</b>	<b>96</b>
	<b>Anexos</b>	<b>102</b>
<b>A</b>	<b>Anexo A</b>	<b>102</b>
A.1	Planos mecánicos . . . . .	102
<b>B</b>	<b>Anexo B</b>	<b>123</b>
B.1	Algoritmo de procesamiento digital de imágenes . . . . .	123
B.2	Algoritmo del generador de trayectorias . . . . .	127

## Índice de figuras

1.1	Ejemplo de robot cartesiano. . . . .	2
1.2	Ejemplo de robot esférico. . . . .	3
1.3	Ejemplo de robot antropomórfico. . . . .	3
1.4	Ejemplo de robot configuración cilíndrica. . . . .	4
1.5	Ejemplo de robot SCARA. . . . .	4
1.6	Ejemplo de robot SCARA. . . . .	5
1.7	Principales aspectos de interés del procesamiento digital de imágenes. . .	7
1.8	Principales etapas del procesamiento digital de imágenes. . . . .	8
1.9	Ejemplo de procesado de imágenes, cambio de color a escala de grises. . .	9
1.10	Ejemplos de segmentación de imágenes. . . . .	9
1.11	Representación de objetos obtenidos mediante imágenes. . . . .	10
1.12	Reconocimiento e interpretación de objetos dentro de la imagen. . . . .	10
1.13	Restauración de escritos antiguos mediante procesamiento digital de imágenes. . . . .	11
1.14	Radiografía médica. . . . .	11
1.15	Calibradora de cereza. . . . .	12
1.16	Identificación de bacterias. . . . .	12
1.17	Reconocimiento de patentes mediante procesamiento digital de imágenes. . .	13
1.18	Detección de síntomas de COVID-19 mediante cámaras térmicas. . . . .	13
2.1	Morfología base del manipulador SCARA para realizar el diseño. . . . .	17
2.2	Sistema de transmisión poleas-correa. . . . .	18
2.3	Diagrama de cuerpo libre eje de eslabones. . . . .	20
2.4	Diagrama de fuerza de corte eje X para eje de transmisión de los eslabones. . .	21
2.5	Diagrama de momento eje X para eje de transmisión de los eslabones. . .	22
2.6	Diagrama de fuerza cortante eje Y para eje de transmisión de los eslabones. . .	22
2.7	Diagrama de momento eje Y para eje de transmisión de los eslabones. . .	23
2.8	Diagrama de cuerpo libre eje base rotatoria. . . . .	25
2.9	Diagrama de fuerza cortante eje X, para eje de base rotatoria. . . . .	26
2.10	Diagrama de momento eje X, para eje de base rotatoria. . . . .	26
2.11	Diagrama de fuerza cortante eje Y, para eje de base rotatoria. . . . .	27
2.12	Diagrama de momento eje Y, para eje de base rotatoria. . . . .	27
2.13	Diseño 3D manipulador SCARA. . . . .	30
2.14	Esfuerzo máximo generado en la estructura del manipulador con carga 1 Kg. . . . .	31
2.15	Esfuerzos generado en la estructura del manipulador con carga 1 Kg. . .	31
2.16	Deformaciones generadas en la estructura del manipulador con carga 1 Kg. . .	32
2.17	Piezas de la estructura del manipulador cortadas mediante cortadora láser. . .	32
2.18	Construcción manipulador SCARA. . . . .	33
2.19	Construcción manipulador SCARA. . . . .	33
2.20	Corriente consumida por el electroimán. . . . .	34
2.21	Voltaje de operación electroimán. . . . .	34
2.22	Diagrama de cuerpo libre de fuerzas que interactúan sobre el objeto a mover. . .	35
2.23	Diagrama de conexión articulación rotatoria 1. . . . .	37
2.24	Diagrama de conexión articulación rotatoria 2. . . . .	37

2.25	Diagrama de conexión articulación rotatoria 3. . . . .	38
2.26	Diagrama de conexión articulación prismática. . . . .	38
2.27	Diagrama de conexión electroimán. . . . .	39
3.1	Denavit-Hartenberg manipulador SCARA 4 grados de libertad. . . . .	41
3.2	Simulación manipulador SCARA con Robotics Toolbox. . . . .	43
3.3	Espacio de trabajo manipulador SCARA estimado. . . . .	44
3.4	Movimiento de rotación articulación 1. . . . .	44
3.5	Movimiento de rotación articulación 2 con zoom. . . . .	45
3.6	Movimiento de rotación real articulación 2. . . . .	45
3.7	Movimiento de rotación articulación 3 con zoom. . . . .	46
3.8	Movimiento de rotación real articulación 3. . . . .	46
3.9	Análisis geométrico manipulador SCARA 4 grados de libertad. . . . .	47
3.10	Geometría de los eslabones del manipulador SCARA en el plano XY. . .	48
3.11	Posiciones obtenidas vs posiciones dadas plano XY. . . . .	50
3.12	Posiciones obtenidas vs posiciones dadas plano XY con zoom 1. . . . .	51
3.13	Posiciones obtenidas vs posiciones dadas plano XY con zoom 2. . . . .	51
3.14	Posiciones obtenidas vs posiciones dadas plano XY con zoom 3. . . . .	52
3.15	Ángulo de rotación articulación 1. . . . .	52
3.16	Ángulo de rotación articulación 2. . . . .	53
3.17	Ángulo de rotación articulación 3. . . . .	53
3.18	Ángulo de orientación con respecto a la horizontal. . . . .	54
3.19	Posiciones obtenidas vs posiciones dadas eje Z. . . . .	54
3.20	Obtención de momentos de inercia. . . . .	55
4.1	Posición de cámaras y espacio de trabajo para procesamiento digital de imágenes. . . . .	59
4.2	Diagrama de flujo del proceso de detección de objetos. . . . .	60
4.3	Modelo de color HSV. . . . .	60
4.4	Detección de color azul trabajando con cuadrados. . . . .	61
4.5	Detección de color rojo trabajando con círculos. . . . .	62
4.6	Detección de color verde trabajando con triángulos. . . . .	62
4.7	Detección cuadrado verde. . . . .	62
4.8	Detección triángulo azul. . . . .	63
4.9	Detección círculo rojo. . . . .	63
4.10	Modelo de cámaras pinhole. . . . .	63
4.11	Variación modelo pinhole. . . . .	64
4.12	Obtención de distancias en los ejes X e Y para circulo verde. . . . .	65
4.13	Medición manual de distancia eje X para circulo verde, con valor resultante 193 mm. . . . .	65
4.14	Medición manual de distancia eje Y para circulo verde, con valor resultante 442 mm. . . . .	65
4.15	Obtención de distancias en los ejes X e Y para triangulo azul. . . . .	66
4.16	Medición manual de distancia eje X para triangulo azul, con valor resul- tante 230 mm. . . . .	66
4.17	Medición manual de distancia eje Y para triangulo azul, con valor resul- tante 405 mm. . . . .	66
4.18	Posición del circulo verde en el espacio de trabajo del manipulador. . . .	67

4.19	Posición del triángulo rojo en el espacio de trabajo del manipulador. . .	68
4.20	Posición del cuadrado azul en el espacio de trabajo del manipulador. . .	68
4.21	Diagrama de flujo de las principales actividades desarrolladas en el procesamiento digital de imágenes. . . . .	69
4.22	Diagrama de flujo generador de trayectorias. . . . .	70
4.23	Cálculos realizados mediante el generador de trayectoria. . . . .	71
4.24	Secuencia para el homing de la articulación prismática. (a) Límite inferior. (b) Límite superior. . . . .	72
4.25	Secuencia para el homing de la articulación rotatoria 3. (a) Límite de giro sentido horario. (b) Límite de giro sentido antihorario. (c) Home de la articulación finalizado. . . . .	73
4.26	Secuencia para el homing de la articulación rotatoria 2. (a) Límite de giro sentido horario. (b) Límite de giro sentido antihorario. (c) Home de la articulación finalizado. . . . .	73
4.27	Secuencia para el homing de la base rotatoria. (a) Límite de giro sentido horario. (b) Límite de giro sentido antihorario. (c) Home de la articulación finalizado. . . . .	74
4.28	Posición de homing del manipulador. . . . .	75
4.29	Secuencia de posicionamiento manipulador SCARA, mediante ingreso de coordenadas desde el puerto serial de Arduino. (a) Rotación articulación rotatoria 3. (b) Rotación articulación rotatoria 2. (c) Rotación base rotatoria. (d) Desplazamiento articulación prismática. . . . .	76
4.30	Ingreso de datos para método de selección por color. . . . .	76
4.31	Ingreso de datos para método de selección color-forma. . . . .	77
4.32	Secuencia de posicionamiento manipulador SCARA, mediante ingreso de coordenadas fijas desde procesamiento de imágenes. (a) Rotación articulación rotatoria 3. (b) Rotación articulación rotatoria 2. (c) Rotación base rotatoria. (d) Desplazamiento articulación prismática. . . . .	77
5.1	Ingreso de método de selección para color azul en la consola de Python. .	78
5.2	Coordenadas obtenidas por el procesamiento digital de imágenes para el objeto de color azul. . . . .	79
5.3	Secuencia de posicionamiento manipulador SCARA sobre objeto de color azul. (a) Rotación articulación rotatoria 3. (b) Rotación articulación rotatoria 2. (c) Rotación base rotatoria. (d) Desplazamiento articulación prismática. . . . .	79
5.4	Ingreso de método de selección color-forma para el cubo de color verde en la consola de Python. . . . .	80
5.5	Coordenadas obtenidas por el procesamiento digital de imágenes para el cubo de color verde. . . . .	80
5.6	Secuencia de posicionamiento manipulador SCARA sobre el cubo verde. (a) Rotación articulación rotatoria 3. (b) Rotación articulación rotatoria 2. (c) Rotación base rotatoria. (d) Desplazamiento articulación prismática. . . . .	81
5.7	Ingreso de datos al puerto serial de Arduino, para la realización de rutinas. . . . .	83

5.8	Secuencia de rutina del manipulador SCARA para objeto de color azul, mediante el ingreso de datos por el puerto serial. (a) Rotación articulación rotatoria 3. (b) Rotación articulación rotatoria 2. (c) Rotación base rotatoria. (d) Desplazamiento articulación prismática. (e) Levantamiento del objeto. (f) Distribución del objeto. . . . .	84
5.9	Secuencia de rutina del manipulador SCARA para objeto de color rojo, mediante el ingreso de datos por el puerto serial. (a) Rotaciones articulaciones rotatorias 3 y 2. (b) Rotación base rotatoria. (c) Desplazamiento articulación prismática. (d) Levantamiento del objeto. (e) Distribución del objeto. . . . .	85
5.10	Secuencia de rutina del manipulador SCARA para objeto de color verde, mediante el ingreso de datos por el puerto serial. (a) Rotación articulación rotatoria 3. (b) Rotación articulación rotatoria 2. (c) Rotación base rotatoria. (d) Desplazamiento articulación prismática. (e) Levantamiento del objeto. (f) Distribución del objeto. . . . .	86
5.11	Ingreso de método de selección para objeto de color rojo. . . . .	87
5.12	Coordenadas obtenidas por el procesamiento digital de imágenes, para objeto de color rojo. . . . .	87
5.13	Secuencia de rutina del manipulador SCARA para objeto de color rojo. (a) Rotación articulación rotatoria 3. (b) Rotación articulación rotatoria 2. (c) Rotación base rotatoria. (d) Desplazamiento articulación prismática. (e) Levantamiento del objeto. (f) Distribución del objeto. . . . .	88
5.14	Ingreso de método de selección para círculo verde. . . . .	89
5.15	Coordenadas obtenidas por el procesamiento digital de imágenes, para círculo verde . . . . .	89
5.16	Secuencia de rutina del manipulador SCARA para círculo verde. (a) Rotación articulación rotatoria 3. (b) Rotación articulación rotatoria 2. (c) Rotación base rotatoria. (d) Desplazamiento articulación prismática. (e) Levantamiento del objeto. (f) Distribución del objeto. . . . .	90
5.17	Ingreso de método de selección para triángulo azul. . . . .	91
5.18	Coordenadas obtenidas por el procesamiento digital de imágenes, para triángulo azul . . . . .	91
5.19	Secuencia de rutina del manipulador SCARA para triángulo azul. (a) Rotación articulación rotatoria 3. (b) Rotación articulación rotatoria 2. (c) Rotación base rotatoria. (d) Desplazamiento articulación prismática. (e) Levantamiento del objeto. (f) Distribución del objeto. . . . .	92
A.1	Plano de las placas frontales de la base del manipulador. . . . .	102
A.2	Plano de la placa inferior de la base del manipulador. . . . .	103
A.3	Plano de las placas laterales de la base del manipulador . . . . .	104
A.4	Plano de la placa superior de la base del manipulador. . . . .	105
A.5	Plano de ensamble de la base del manipulador. . . . .	106
A.6	Plano de la placa inferior de la base prismática. . . . .	107
A.7	Plano de las placas laterales de la base prismática . . . . .	108
A.8	Plano de la placa superior de la base prismática. . . . .	109
A.9	Plano de ensamble de la base prismática. . . . .	110
A.10	Plano de la placa superior N°1 del eslabón 1. . . . .	111

A.11	Plano de la placa superior N°2 del eslabón 1. . . . .	112
A.12	Plano de la placa inferior del eslabón 1. . . . .	113
A.13	Plano de ensamble eslabón 1. . . . .	114
A.14	Plano de la placa superior N°1 del eslabón 2. . . . .	115
A.15	Plano de la placa superior N°2 del eslabón 2. . . . .	116
A.16	Plano de la placa inferior del eslabón 2. . . . .	117
A.17	Plano de ensamble eslabón 2. . . . .	118
A.18	Plano de las placas superiores del eslabón 3. . . . .	119
A.19	Plano de la placa inferior del eslabón 3. . . . .	120
A.20	Plano del eslabón 3 ensamblado. . . . .	121
A.21	Plano del manipulador SCARA ensamblado. . . . .	122

## Índice de tablas

2.1	Valores de fuerza tangencial para cada polea. . . . .	19
2.2	Valores de las componentes en X e Y de la fuerza de flexión para el eje de transmisión de los eslabones. . . . .	21
2.3	Parámetros y valores del proceso de cálculo del límite de fatiga promedio para el eje de transmisión. . . . .	24
2.4	Parámetros y valores del proceso de cálculo del eje de transmisión de los eslabones. . . . .	24
2.5	Valores de fuerza tangencial calculados para cada polea de la base rotatoria. . . . .	24
2.6	Valores de las componentes en X e Y de la fuerza de flexión para el eje de transmisión de la base rotatoria. . . . .	25
2.7	Parámetros y valores del proceso de cálculo del eje de transmisión de la articulación rotatoria. . . . .	28
3.1	Parámetros y variables Denavit- Hartenberg manipulador SCARA 4 grados de libertad. . . . .	41
3.2	Valores de parámetros geométricos manipulador SCARA 4 grados de libertad. . . . .	43
3.3	Momentos de inercia, masas y posición de centro de masa de eslabones manipulador SCARA. . . . .	56
4.1	Rangos establecidos para los colores segun el modelo HSV. . . . .	61
4.2	Valores de distancia focal obtenidos para para ambas cámaras. . . . .	64
4.3	Coordenadas reales del círculo verde. . . . .	68
4.4	Coordenadas reales del triángulo rojo. . . . .	68
4.5	Coordenadas reales del cuadrado azul. . . . .	68
5.1	Coordenadas obtenidas por el procesamiento digital de imágenes para el objeto de color azul. . . . .	79
5.2	Coordenadas obtenidas por el procesamiento digital de imágenes para el cubo de color verde. . . . .	80
5.3	Ángulos de rotación de la base rotatoria, para distribución de objetos mediante método de selección por color. . . . .	82
5.4	Ángulos de rotación de la base rotatoria, para distribución de objetos mediante método de selección por color y forma. . . . .	82
5.5	Coordenadas X e Y obtenidas por el procesamiento digital de imágenes, para objeto de color rojo. . . . .	87
5.6	Coordenadas X e Y obtenidas por el procesamiento digital de imágenes, para círculo verde. . . . .	89
5.7	Coordenadas X e Y obtenidas por el procesamiento digital de imágenes, para triángulo azul. . . . .	91