
Exploración de herramientas de captura de movimiento en 2D sin marcadores con aprendizaje automático

Aldo Sebastian Caniz Rosales



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Exploración de herramientas de captura de movimiento en 2D
sin marcadores con aprendizaje automático**

Trabajo de graduación presentado por Aldo Sebastian Caniz Rosales
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Exploración de herramientas de captura de movimiento en 2D
sin marcadores con aprendizaje automático**

Trabajo de graduación presentado por Aldo Sebastian Caniz Rosales
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica


Guatemala,

2024

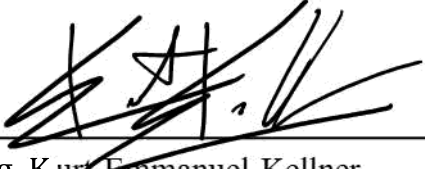
Vo.Bo.:

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

Tribunal Examinador:

(f) 
M.Sc. Carlos Esquit

(f) 
M. Sc. Miguel Enrique Zea Arenales

(f) 
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de febrero de 2025.

El siguiente trabajo surge por mi interés hacia los sistemas biomecánicos, cuales pueden ser explorados a mayor profundidad en el futuro. Esperando que pueda ser aplicable a siguientes trabajos de graduación e investigaciones. Mientras realizaba este trabajo conté con el apoyo de mi asesor, Miguel Zea, quien me brindó orientación en cada etapa y desarrollo. Agradeciendo de la misma forma a los catedráticos que durante mi estadía en la universidad impactaron de forma positiva a mis conocimientos, y así mismo, a mi crecimiento como persona.

De la misma manera, agradezco el apoyo de mis padres, Alfredo Caniz y Dora Rosales, quienes me apoyaron activamente durante la duración de mis estudios universitarios y estuvieron presentes en cada momento. Además, agradezco a mis hermanos, Alejandra, José y Daniela, los cuales me motivaban en cada momento de desesperación y me brindaron su comprensión en los malos tiempos. A mi familia en general, que estuvieron ahí cuando necesitaba una mano externa. A todos mis amigos, dentro y fuera de la universidad, porque lograban mantener una sonrisa en mí cuando no era capaz de tenerla por mí mismo. A los amigos que hice durante la carrera espero que las metas propuestas después de esta etapa se les conceda, y que el esfuerzo que mantuvieron firme hasta el último día siga así en el futuro.

Prefacio	III
Lista de figuras	XIII
Lista de cuadros	XIV
Resumen	XV
Abstract	XVI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
3. Justificación	4
4. Objetivos	5
4.1. Objetivo general	5
4.2. Objetivos específicos	5
5. Alcance	6
6. Marco teórico	8
6.1. Aprendizaje automático	8
6.2. Aprendizaje profundo	8
6.3. Redes neuronales artificiales	9
6.4. Redes neuronales convolucionales	9
6.5. Especificaciones de cámaras	10
6.6. FreeMoCap	11
6.7. ChArUco	11
6.8. Tracker	12
6.9. Código abierto	13

7. Exploración de herramientas y análisis 2D	14
7.1. Criterios de selección	14
7.2. Herramientas evaluadas	14
7.2.1. Theia Markerless	14
7.2.2. Move AI	15
7.2.3. Captury	15
7.2.4. AR-51	15
7.2.5. Simi	15
7.2.6. iPi Soft	15
7.2.7. Remocapp	15
7.2.8. FreeMoCap	16
7.3. Tabla de comparación	16
7.4. Configuración utilizada para la toma de datos	16
7.4.1. Prueba de movimiento lineal simple en eje X	16
7.4.2. Prueba de movimiento lineal simple en eje Y	17
7.4.3. Prueba de movimiento curvilíneo	17
7.5. Comparación	18
7.5.1. Configuración en FreeMoCap	18
7.5.2. Configuración en Tracker	19
7.6. Resultados estadísticos	20
7.6.1. Prueba de movimiento lineal simple en eje X	20
7.6.2. Prueba de movimiento lineal simple en eje Y	22
7.6.3. Prueba de movimiento curvilíneo	24
7.7. Resultados cualitativos	26
7.7.1. Prueba de movimiento lineal simple en eje X	26
7.7.2. Prueba de movimiento lineal simple en eje Y	35
7.7.3. Prueba de movimiento curvilíneo	43
8. Análisis 3D	50
8.1. Configuración utilizada para la toma de datos	50
8.2. Calibración	51
8.3. Esqueleto	51
8.4. Comparación	52
8.4.1. Cabeza	54
8.4.2. Hombro derecho	56
8.4.3. Hombro izquierdo	57
8.4.4. Brazo superior derecho	59
8.4.5. Brazo superior izquierdo	60
8.4.6. Codo derecho	61
8.4.7. Codo izquierdo	62
8.4.8. Muñeca derecha	63
8.4.9. Muñeca izquierda	64
8.4.10. Mano derecha	65
8.4.11. Mano izquierda	66
8.4.12. Cintura derecha	67
8.4.13. Cintura izquierda	68
8.4.14. Muslo derecho	70
8.4.15. Muslo izquierdo	71

8.4.16. Rodilla derecha	72
8.4.17. Rodilla izquierda	73
8.4.18. Tobillo derecho	74
8.4.19. Tobillo izquierdo	75
8.4.20. Talón derecho	76
8.4.21. Talón izquierdo	77
8.4.22. Pie derecho	78
8.4.23. Pie izquierdo	79
9. Conclusiones	82
10.Recomendaciones	83
11.Bibliografía	84

Lista de figuras

1.	Vista frontal del ecosistema Robotat con las cámaras instaladas.	2
2.	Estructura de una red neuronal [6].	9
3.	Tablero ChArUco [8].	12
4.	Prueba de movimiento a través de una caminata lineal para el análisis 2D. . .	17
5.	Prueba de movimiento a través de saltos verticales para el análisis 2D.	17
6.	Prueba de movimiento a través de un salto parabólico para el análisis 2D. . .	17
7.	Configuración de la aplicación FreeMoCap para cada toma realizada.	18
8.	Configuración de la aplicación FreeMoCap para cada toma realizada.	18
9.	Configuración de la aplicación FreeMoCap para cada toma realizada.	19
10.	Configuración de la aplicación Tracker para cada toma realizada, ejemplo de la prueba de una caminata lineal para el análisis 2D.	19
11.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cabeza de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	26
12.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cabeza de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	26
13.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	27
14.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	27
15.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	27
16.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	27
17.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	28
18.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	28
19.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	28
20.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	28

21.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	29
22.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	29
23.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	29
24.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	29
25.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	30
26.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	30
27.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	30
28.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	30
29.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	31
30.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	31
31.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	31
32.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	31
33.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	32
34.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	32
35.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	32
36.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.	32
37.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cabeza de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	35
38.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cabeza de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	35
39.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	35
40.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	35
41.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	36
42.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	36
43.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	36
44.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	36

45.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	37
46.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	37
47.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	37
48.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	37
49.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	38
50.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	38
51.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	38
52.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	38
53.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	39
54.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	39
55.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	39
56.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	39
57.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	40
58.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	40
59.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	40
60.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	40
61.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	41
62.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.	41
63.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cabeza de la prueba de movimiento curvilíneo.	43
64.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cabeza de la prueba de movimiento curvilíneo.	43
65.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.	43
66.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.	43
67.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.	44
68.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.	44

69.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.	44
70.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.	44
71.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.	45
72.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.	45
73.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.	45
74.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.	45
75.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.	46
76.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.	46
77.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.	46
78.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.	46
79.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.	47
80.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.	47
81.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.	47
82.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.	47
83.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.	48
84.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.	48
85.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.	48
86.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.	48
87.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.	48
88.	Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.	48
89.	Cámaras ubicadas dentro del Robotat.	50
90.	Marcadores ubicados en MediaPipe Pose [19].	51
91.	Configuración <i>Baseline</i> en vista frontal [23].	52
92.	Configuración <i>Baseline</i> en vista trasera [23].	52
93.	Configuración <i>Baseline</i> aplicada al traje en vista frontal.	52
94.	Configuración <i>Baseline</i> aplicada al traje en vista trasera.	52
95.	Toma inicial en la vista desde la cámara 1 de FreeMoCap.	53

96.	Toma final en la vista desde la cámara 1 de FreeMoCap.	53
97.	Toma inicial en la vista desde la cámara 2 de FreeMoCap.	53
98.	Toma final en la vista desde la cámara 2 de FreeMoCap.	53
99.	Toma inicial en la vista desde la cámara 3 de FreeMoCap.	53
100.	Toma final en la vista desde la cámara 3 de FreeMoCap.	53
101.	Toma inicial vista en OptiTrack desde el programa Mokka [24].	54
102.	Toma final vista en OptiTrack desde el programa Mokka [24].	54
103.	Marca en la frente procesada por OptiTrack.	54
104.	Marca en el costado de la cabeza procesada por OptiTrack.	54
105.	Marca en la cabeza alta procesada por OptiTrack.	55
106.	Marca en la cabeza procesada por FreeMoCap.	55
107.	Comparación aproximada de la marca en la frente.	55
108.	Comparación aproximada de la marca en el costado de la cabeza.	55
109.	Comparación aproximada de la marca en la cabeza alta.	55
110.	Marca en la parte trasera del hombro derecho procesada con OptiTrack. . . .	56
111.	Marca en la parte superior del hombro derecho procesada con OptiTrack. . .	56
112.	Marca del hombro derecho procesada por FreeMoCap.	56
113.	Comparación aproximada de la marca en la parte trasera del hombro derecho.	56
114.	Comparación aproximada de la marca en la parte superior del hombro derecho.	57
115.	Marca en la parte trasera del hombro izquierdo procesada con OptiTrack. . .	57
116.	Marca en la parte superior del hombro izquierdo procesada con OptiTrack. . .	57
117.	Marca del hombro izquierdo procesada por FreeMoCap.	58
118.	Comparación aproximada de la marca en la parte trasera del hombro izquierdo.	58
119.	Comparación aproximada de la marca en la parte superior del hombro izquierdo.	58
120.	Marca del brazo superior derecho procesada por OptiTrack.	59
121.	Marca del brazo superior derecho procesada por FreeMoCap.	59
122.	Comparación aproximada de la marca del brazo superior derecho.	59
123.	Marca del brazo superior izquierdo procesada por OptiTrack.	60
124.	Marca del brazo superior izquierdo procesada por FreeMoCap.	60
125.	Comparación aproximada de la marca del brazo superior izquierdo.	60
126.	Marca del codo derecho procesada por OptiTrack.	61
127.	Marca del codo derecho procesada por FreeMoCap.	61
128.	Comparación aproximada de la marca del codo derecho.	61
129.	Marca del codo izquierdo procesada por OptiTrack.	62
130.	Marca del codo izquierdo procesada por FreeMoCap.	62
131.	Comparación aproximada de la marca del codo izquierdo.	62
132.	Marca de la parte interior de la muñeca derecha procesada por OptiTrack. . .	63
133.	Marca de la parte exterior de la muñeca derecha procesada por OptiTrack. . .	63
134.	Marca de la muñeca derecha procesada por FreeMoCap.	63
135.	Comparación aproximada de la marca de la parte interior de la muñeca derecha.	63
136.	Comparación aproximada de la marca de la parte exterior de la muñeca derecha.	63
137.	Marca de la parte interior de la muñeca izquierda procesada por OptiTrack. .	64
138.	Marca de la parte exterior de la muñeca izquierda procesada por OptiTrack. .	64
139.	Marca de la muñeca izquierda procesada por FreeMoCap.	64
140.	Comparación aproximada de la marca de la parte interior de la muñeca iz- quierda.	64
141.	Comparación aproximada de la marca de la parte exterior de la muñeca iz- quierda.	65

142.	Marca de la mano derecha procesada por OptiTrack.	65
143.	Marca de la mano derecha procesada por FreeMoCap.	65
144.	Comparación aproximada de la marca de la mano derecha.	66
145.	Marca de la mano izquierda procesada por OptiTrack.	66
146.	Marca de la mano izquierda procesada por FreeMoCap.	66
147.	Comparación aproximada de la marca de la mano izquierda.	67
148.	Marca de la cintura derecha procesada por OptiTrack.	67
149.	Marca de la cintura derecha procesada por FreeMoCap.	67
150.	Comparación aproximada de la marca de la cintura derecha.	68
151.	Marca de la parte trasera de la cintura izquierda procesada por OptiTrack.	68
152.	Marca de la parte delantera de la cintura izquierda procesada por OptiTrack.	68
153.	Marca de la cintura derecha procesada por FreeMoCap.	69
154.	Comparación aproximada de la marca de la parte trasera de la cintura izquierda.	69
155.	Comparación aproximada de la marca de la parte delantera de la cintura izquierda.	69
156.	Marca del muslo derecho procesada por OptiTrack.	70
157.	Marca del muslo derecho procesada por FreeMoCap.	70
158.	Comparación aproximada de la marca del muslo derecho.	70
159.	Marca del muslo izquierdo procesada por OptiTrack.	71
160.	Marca del muslo izquierdo procesada por FreeMoCap.	71
161.	Comparación aproximada de la marca del muslo izquierdo.	71
162.	Marca de la rodilla derecha procesada por OptiTrack.	72
163.	Marca de la rodilla derecha procesada por FreeMoCap.	72
164.	Comparación aproximada de la marca de la rodilla derecha.	72
165.	Marca de la rodilla izquierda procesada por OptiTrack.	73
166.	Marca de la rodilla izquierda procesada por FreeMoCap.	73
167.	Comparación aproximada de la marca de la rodilla izquierda.	73
168.	Marca del tobillo derecho procesada por OptiTrack.	74
169.	Marca del tobillo derecho procesada por FreeMoCap.	74
170.	Comparación aproximada de la marca del tobillo derecho.	74
171.	Marca del tobillo izquierdo procesada por OptiTrack.	75
172.	Marca del tobillo izquierdo procesada por FreeMoCap.	75
173.	Comparación aproximada de la marca del tobillo izquierdo.	75
174.	Marca del talón derecho procesada por OptiTrack.	76
175.	Marca del talón derecho procesada por FreeMoCap.	76
176.	Comparación aproximada de la marca del talón derecho.	76
177.	Marca del talón izquierdo procesada por OptiTrack.	77
178.	Marca del talón izquierdo procesada por FreeMoCap.	77
179.	Comparación aproximada de la marca del talón izquierdo.	77
180.	Marca en la punta del pie derecho procesada por OptiTrack.	78
181.	Marca en el interior del pie derecho procesada por OptiTrack.	78
182.	Marca en el exterior del pie derecho procesada por OptiTrack.	78
183.	Marca en el pie derecho procesada por FreeMoCap.	78
184.	Comparación aproximada de la marca en la punta del pie derecho.	78
185.	Comparación aproximada de la marca en el interior del pie derecho.	78
186.	Comparación aproximada de la marca en el exterior del pie derecho.	79
187.	Marca en la punta del pie izquierdo procesada por OptiTrack.	79
188.	Marca en el interior del pie izquierdo procesada por OptiTrack.	79

189. Marca en el exterior del pie izquierdo procesada por OptiTrack.	80
190. Marca en el pie izquierdo procesada por FreeMoCap.	80
191. Comparación aproximada de la marca en la punta del pie izquierdo.	80
192. Comparación aproximada de la marca en el interior del pie izquierdo.	80
193. Comparación aproximada de la marca en el exterior del pie izquierdo.	80

1.	Comparación entre herramientas	16
2.	Datos estadísticos de Tracker en el eje X durante la prueba de movimiento lineal simple en eje X	20
3.	Datos estadísticos de FreeMoCap en el eje X durante la prueba de movimiento lineal simple en eje X	20
4.	Datos estadísticos de Tracker en el eje Y durante la prueba de movimiento lineal simple en eje X	21
5.	Datos estadísticos de FreeMoCap en el eje Y durante la prueba de movimiento lineal simple en eje X	21
6.	Datos estadísticos de Tracker en el eje X durante la prueba de movimiento lineal simple en eje Y	22
7.	Datos estadísticos de FreeMoCap en el eje X durante la prueba de movimiento lineal simple en eje Y	22
8.	Datos estadísticos de Tracker en el eje Y durante la prueba de movimiento lineal simple en eje Y	23
9.	Datos estadísticos de FreeMoCap en el eje Y durante la prueba de movimiento lineal simple en eje Y	23
10.	Datos estadísticos de Tracker en el eje X durante la prueba de movimiento curvilíneo	24
11.	Datos estadísticos de FreeMoCap en el eje X durante la prueba de movimiento curvilíneo	24
12.	Datos estadísticos de Tracker en el eje Y durante la prueba de movimiento curvilíneo	25
13.	Datos estadísticos de FreeMoCap en el eje Y durante la prueba de movimiento curvilíneo	25

En este trabajo se presenta una exploración de sistemas emergentes para la captura de movimiento sin marcadores, con un enfoque en tecnologías que emplean aprendizaje automático. La investigación se centró en herramientas gratuitas y accesibles para cualquier usuario, descartando aquellas que no cumplían con estos criterios. Se analizó un conjunto de opciones y, tras una evaluación inicial, se seleccionó FreeMoCap como el sistema que ofreció los mejores resultados.

Este sistema fue comparado con otras herramientas reconocidas, como Tracker, una solución de configuración manual para el análisis de movimientos en 2D, y OptiTrack, un software avanzado que emplea marcadores físicos para el seguimiento de movimientos en 3D.

Se llevaron a cabo dos análisis principales, por un lado, se evaluaron los resultados de FreeMoCap en el plano 2D mediante pruebas cuantitativas y cualitativas, y por otro, se exploraron sus capacidades en el espacio 3D. Durante las pruebas en 2D, se obtuvieron datos estadísticos que, aunque fueron positivos, no resultaron ser completamente fáciles de validar a la herramienta como sustituto de los sistemas existentes. Por ello, se complementó el análisis con una comparación cualitativa.

En el análisis 3D, la comparación se realizó únicamente de forma cualitativa, debido a las diferencias entre los sistemas que utilizan marcadores físicos y aquellos que no los requieren. Las pruebas resaltaron que FreeMoCap, a pesar de ciertas limitaciones en escenarios específicos, tiene el potencial de ofrecer resultados comparables a herramientas más costosas y complejas, lo que lo posiciona como una alternativa viable para usuarios con restricciones de presupuesto.

Finalmente, se concluyó que FreeMoCap representa una solución prometedora para la captura de movimiento sin marcadores. Su facilidad de uso y su disponibilidad gratuita lo convierten en una opción frente a herramientas menos accesibles o más tediosas de configurar. Aunque aún presenta áreas de mejora, este sistema permite que una mayor cantidad de usuarios pueda acceder a esta tecnología sin necesidad de invertir en equipos especializados o licencias costosas.

This work presents an exploration of emerging systems for markerless motion capture, with a focus on technologies that employ machine learning. The research focused on free and accessible tools for any user, excluding those that did not meet these criteria. A set of options was analyzed, and after an initial evaluation, FreeMoCap was selected as the system that offered the best results.

This system was compared with other well-known tools, such as Tracker, a manual configuration solution for 2D motion analysis, and OptiTrack, an advanced software that uses physical markers for 3D motion tracking.

Two main analyses were conducted: on the one hand, the 2D results of FreeMoCap were evaluated through quantitative and qualitative tests; on the other hand, its capabilities in the 3D space were explored. During the 2D tests, statistical data were obtained that, while positive, were not entirely sufficient to validate the tool as a substitute for existing systems. For this reason, the analysis was supplemented with a qualitative comparison.

In the 3D analysis, the comparison was performed only qualitatively, due to the differences between systems that use physical markers and those that do not require them. The tests highlighted that FreeMoCap, despite certain limitations in specific scenarios, has the potential to deliver results comparable to more expensive and complex tools, positioning it as a viable alternative for users with budget constraints.

Finally, it was concluded that FreeMoCap represents a promising solution for markerless motion capture. Its ease of use and free availability make it a viable option compared to less accessible or more tedious-to-configure tools. Although it still has areas for improvement, this system allows a broader range of users to access this technology without needing to invest in specialized equipment or expensive licenses.

En el campo de la captura de movimiento, las tecnologías basadas en aprendizaje automático han abierto nuevas posibilidades para la obtención de datos detallados y con gran precisión sin la necesidad de sistemas tradicionales con marcadores. Estos avances prometen reducir costos, mejorar la accesibilidad y simplificar la configuración, especialmente en aplicaciones donde los sistemas tradicionales no son viables. Sin embargo, es fundamental evaluar rigurosamente la calidad y precisión de estas herramientas para determinar su utilidad en contextos reales.

El presente trabajo se centra en el análisis y evaluación de programas de captura de movimiento sin marcadores que utiliza aprendizaje automático. Para ello, se diseñaron y realizaron dos pruebas clave. La primera, en un entorno 2D, donde se comparó los resultados del programa con los de una herramienta de configuración manual ampliamente utilizada, como Tracker. La segunda prueba se llevó a cabo en un entorno 3D, donde los resultados obtenidos se contrastaron con los de un sistema de captura de movimiento con marcadores, OptiTrack, el cual es uno de los sistemas más utilizados.

El objetivo principal de este estudio fue analizar la calidad de los datos generados por el programa en relación con métodos establecidos, considerando aspectos como la precisión, consistencia y facilidad de uso. Con ello, se buscó contribuir al desarrollo y adopción de tecnologías más accesibles en el ámbito de la captura de movimiento, evaluando su capacidad para integrarse en flujos de trabajo actuales sin comprometer la calidad de los resultados.

La captura de movimiento es una técnica de grabación utilizada para realizar imágenes por computadora de humanos, animales y objetos la cual es utilizada para investigación, cine, videojuegos o en deportes con fines médicos. Esta se hace a través de técnicas ópticas que utilizan marcadores, ya sean pasivos o activos.

En la Universidad del Valle de Guatemala se utiliza el sistema OptiTrack adaptada dentro del ecosistema Robotat [1], la cual fue configurada para obtener poses de objetos que se encuentran dentro de este espacio, cabe recalcar que este fue hecho para objetos rígidos, por lo que trajes de captura de movimiento para humanos no fueron tomados en cuenta. Este sistema fue ensamblado con cámaras de Prime X 41 con sus respectivos sistemas de colocación al rededor del ecosistema Robotat, al ya tener las herramientas de software y hardware, el sistema fue calibrado para calcular la posición y orientación de las cámaras, el cual pasó por un proceso de enmascarado y la técnica *wanding* con las herramientas necesarias. Durante la implementación de este sistema, se obtuvieron resultados que coincidían con las posiciones en la vida real, logrando como error máximo un valor de 5.28 %. Al realizar este sistema, las limitantes quedan en el gran costo de implementación y en el sistema fijo, es decir, que no se puede trasladar a ninguna otra parte de manera rápida y sencilla.



Figura 1: Vista frontal del ecosistema Robotat con las cámaras instaladas.

Debido a las limitantes que presentan estas herramientas, por el alto costo de adqui-

sición, se ha buscado realizar las capturas de cuerpos humanos sin la necesidad de dichos marcadores, de la cual proviene el programa que en los últimos ha tomado más relevancia y el cual ha enfocado su trabajo en esta nueva tecnología emergente, FreeMoCap [2].

FreeMoCap [2] es un proyecto que empezó con el objetivo de brindar un programa de captura de movimiento sin la necesidad de marcadores. Este programa desarrolló una interfaz basada en GUI que brinda datos cinemáticos a partir de cámaras de bajo costo o bien, videos importados. FreeMoCap logró utilizar el aprendizaje automático, a través de redes neuronales convolucionales, para grabar con precisión a cuerpos completos en movimiento y adaptó las tecnologías emergentes para trabajar con el equipo mínimo de una computadora portátil que poseen una sola cámara, aunque deja la limitante de producir datos 3D poco confiables por lo que se mantiene en el entorno de un plano. La organización recomienda utilizar por lo menos tres cámaras, pueden ser de baja resolución, para lograr una obtención de datos 3D más precisa, aunque también es posible sacrificar datos al utilizar solamente dos cámaras para lograr una toma 3D con menos precisión.

Estos métodos de captura sin marcadores pueden potenciar investigaciones dentro de la Universidad del Valle de Guatemala como trabajos anteriores sobre el reconocimiento de poses humanas por medio de aprendizaje automático con el objetivo de hacer que el robot NAO lograra imitar dichas poses [3]. Al haber utilizado el software MediaPipe, se obtuvieron como resultado las poses capturadas que se mapearon con puntos en el espacio 3D para convertirlas por medio de parámetros de Denavit-Handenberg y fueran comprendidas por las articulaciones del robot. Después de que se obtuvieron los datos de imitación, se pasó por filtros que permitieron tener una mejor precisión en la copia de movimientos capturados.

La limitante principal de este trabajo fue el haberlo realizado con solo una cámara, lo que hizo que los datos en el espacio no fueran tan exactos como los que se hubiese logrado con más cámaras. Durante la investigación se desarrolló un algoritmo que logró imitar las poses en tiempos entre 1.1 milisegundos y 1.5 milisegundos, llegando a ser similar a las capturas de movimiento en tiempo real. A pesar de que los resultados fueron satisfactorios, durante los cálculos de los eslabones y juntas del robot NAO hubo errores que afectaron al movimiento de las extremidades.

La Universidad del Valle de Guatemala posee ya un ambiente de captura de movimiento, el Robotat. El cual ha demostrado ser efectivo en aplicaciones de robótica y bastante potencial en los primeros experimentos realizados dentro de este, como proyectos en biomécanica. A pesar de esto, existen restricciones como el tiempo de uso, su alto costo. Aunque este no sea solo un problema para la universidad, sino que está presente en todos los sistemas de captura de movimiento.

Los programas de captura de movimiento caracterizados por los trajes utilizados en estos, han sido durante los últimos años, poco accesibles para personas que quieran hacer investigaciones, estudios, pruebas o asignaciones en las que se necesite una análisis de biomecanismos. Gracias a esto, han surgido varios programas que realizan una captura de movimiento sin la necesidad de marcadores colocados en el cuerpo y cámaras sofisticadas, que aunque no permite realizar todo lo que un sistema de alto costo logra, deja a libertad la realización de proyectos que no requieren de sistemas complejos.

FreeMoCap, es un proyecto que demuestra ser de los primeros estandartes en estas tecnologías que emergieron a partir de la pandemia del Covid-19, la cual no permitió realizar las tomas de datos en las instalaciones asignadas de captura de movimiento, y que conllevaron buscar otras formas de adaptar los sitios de captura dentro de casas o lugares pequeños.

Realizar una exploración de estos programas para buscar una opción que sea factible para utilizar y fácilmente aplicable, es necesario para abrir el paso a estudios realizados en la Universidad del Valle de Guatemala. Además, estos sistemas sin marcadores, poseen una interfaz amigable con el usuario que dejan a disponibilidad la manipulación de personas que no poseen mucho conocimiento.

En muchas áreas como la robótica, arte, cine, animación, deporte, biomédica, fisioterapia y otros, el análisis de mecanismos humanos son de gran ayuda, lo que puede ser utilizado para nuevos proyectos que utilicen este sistema sin marcadores. Ya que estos programas son acoplables en diferentes ambientes, permiten colocar el ecosistema de análisis en varios lugares donde la calibración y movilidad dificultosa del Robotat no lo permite.

4.1. Objetivo general

Explorar el uso de herramientas de captura de movimiento sin marcadores basadas en aprendizaje automático para el análisis de mecanismos o cuerpos planos en aplicaciones que necesiten captura de movimiento de cuerpos humanoides

4.2. Objetivos específicos

- Listar las herramientas de software de captura de movimiento sin marcadores existentes y detallar las ventajas y limitaciones para su implementación.
- Realizar experimentos, análisis básico en mecanismos planares para contrastar las herramientas encontradas y seleccionar la que mejor se adapte.
- Comparar las herramientas halladas con programas de análisis para mecanismos planares que necesitan configuraciones manuales.
- Contrastar los resultados obtenidos de la mejor herramienta de captura sin marcadores con el sistema OptiTrack.

El desarrollo de esta investigación se enmarcó dentro de las limitaciones y oportunidades proporcionadas en el ecosistema Robotat, donde se llevaron a cabo las pruebas y configuraciones necesarias. Las actividades se desarrollaron en horarios específicos previamente establecidos por las políticas del laboratorio, los cuales limitaban el acceso.

En cuanto a la configuración, se utilizó un número limitado de *markers* en las pruebas, los cuales fueron distribuidos dentro del traje proporcionado. Esto permitió evaluar tanto la precisión como la eficiencia de las herramientas seleccionadas para la captura de movimiento en sin marcadores.

El proyecto requirió una configuración precisa de cámaras web para la captura de video, asegurando su correcta sincronización y posicionamiento. Para optimizar su funcionamiento, se utilizaron extensiones USB y extensores de puertos, permitiendo la conexión de múltiples dispositivos de captura a una única estación de trabajo. Además, se trabajó en la calibración y ajustes necesarios para garantizar que la computadora utilizada fuera capaz de procesar los datos generados sin problemas de rendimiento.

Este alcance se combinó con la implementación de algoritmos de aprendizaje automático para analizar los datos capturados, complementando la comparación con herramientas manuales como Tracker. Las limitaciones prácticas de tiempo y recursos disponibles influyeron en el diseño y la ejecución de las pruebas, pero también ofrecieron un marco realista para evaluar la viabilidad de los sistemas sin marcadores en entornos controlados.

Este estudio se enfoca en evaluar la calidad y precisión de un programa de captura de movimiento sin marcadores basado en aprendizaje automático, utilizando dos escenarios específicos de análisis:

- **Prueba en 2D:** Se analiza el desempeño del programa al capturar movimientos bidimensionales, comparando los resultados obtenidos contra una herramienta de configuración manual para análisis de movimiento. Esta prueba permite evaluar la precisión y consistencia de los datos generados en aplicaciones que no requieren profundidad,

como análisis biomecánicos básicos o estudios de dinámica en planos.

- **Prueba en 3D:** El análisis en un entorno tridimensional, ayuda a observar los resultados del programa los cuales son contrastados con los de un sistema de captura de movimiento basado en marcadores. Este enfoque busca determinar la capacidad del programa para replicar datos en aplicaciones más complejas, como estudios avanzados de biomecánica o en la robótica.

El alcance del trabajo se limita al análisis de precisión y consistencia de los datos obtenidos. Además, se consideran únicamente movimientos humanos básicos, excluyendo dinámicas complejas o captura de objetos inanimados. Con este enfoque, se pretende ofrecer una evaluación objetiva de las capacidades del programa y su potencial para sustituir o complementar herramientas tradicionales en escenarios específicos, sentando las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la captura de movimiento sin marcadores con aprendizaje automático.

El marco teórico de esta investigación proporciona los fundamentos conceptuales y metodológicos necesarios para comprender el contexto y las bases técnicas de la captura de movimiento en 2D sin marcadores, así como su relación con las herramientas basadas en aprendizaje automático.

6.1. Aprendizaje automático

El aprendizaje automático [4] se define como el estudio que da a los computadores la capacidad de aprender sin ser programados de manera explícita, esto se realiza como un programa en dónde el computador aprende de una experiencia, con respecto a una tarea y medido por un rendimiento, en dónde el rendimiento en la tarea mejora con la experiencia. Al seguir realizando estas tomas de datos por medio de aprendizaje automático y se sigue detallando, se llega a un aprendizaje profundo, el cual tiene como base las redes neuronales artificiales.

6.2. Aprendizaje profundo

El término aprendizaje profundo [5], o *deep learning* en inglés, se refiere al entrenamiento de redes más profundas que las comunes.

En el aprendizaje profundo la extracción de características que se realiza a partir de los datos originales suele generar una representación jerárquica: se extraen características de menor a mayor complejidad, de manera independiente. Se definen las características de los niveles superiores en función de las características de los niveles inferiores. El objetivo final de la aplicación del aprendizaje profundo es encontrar las características de alto nivel, de forma que el modelo pueda transformar estas características en la salida esperada, con más facilidad que al emplear la representación original de los datos.

En un modelo de aprendizaje profundo se distinguen la etapa de extracción de características y la etapa de transformación de características. La primera consiste en crear la jerarquía a partir de los datos en bruto del problema, mientras que, la segunda toma las características de más alto nivel de la jerarquía y las utiliza para aplicarles una transformación que permita dar la salida esperada por el sistema.

6.3. Redes neuronales artificiales

Una red neuronal [6], en el aprendizaje automático, que funciona haciendo de forma simultánea un número elevado de procesamientos interconectados. Existen tres partes en una red neuronal: la capa de entrada, que representa los campos que ingresan; una o más capas ocultas, en donde se realizan las iteraciones; y la capa de salida, que representa el campo o campos de destino.

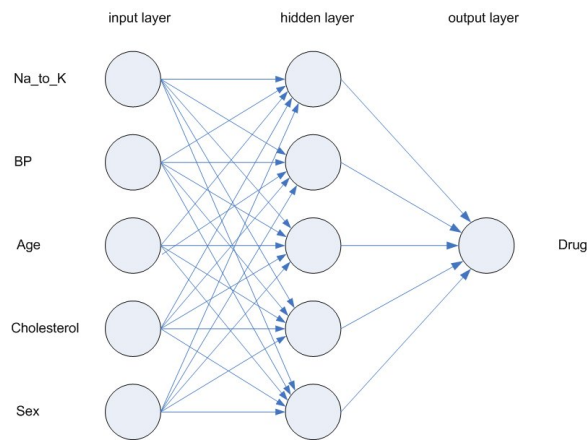


Figura 2: Estructura de una red neuronal [6].

El aprendizaje se realiza examinando los ejemplos individuales, generando una predicción para cada ejemplo y ajustando las iteraciones cuando una predicción es incorrecta, esto ocurre muchas veces y la red mejora sus predicciones hasta alcanzar uno o varios criterios de salida.

Al principio, las ponderaciones son aleatorias y las respuestas resultan anormales. Por esto, las redes neuronales aprenden a través del entrenamiento, para esto se le presentan a la red ejemplos para los que se conoce el resultado, y las respuestas que proporciona se comparan con los resultados conocidos. Con lo aprendido, se pasa hacia atrás a través de la red, cambiando poco a poco las ponderaciones. Mientras el entrenamiento mejora, la red se va haciendo más precisa, y una vez entrenada, la red puede aplicar a casos en los que el resultado es desconocido.

6.4. Redes neuronales convolucionales

Una red neuronal convolucional [7], por sus siglas CNN o también conocida como ConvNet, es una arquitectura de red para el aprendizaje profundo que evoluciona a partir de datos. Son útiles para identificar patrones en imágenes como objetos, clases y categorías.

Estas funcionan a través de iteraciones, pueden tener desde decenas a cientos, en cada capa se aprende a detectar diferentes características de una imagen. Al aplicar filtros a las

imágenes de entrenamiento con distintas resoluciones, la salida resulta como una convolución entre cada imagen que se emplea como entrada y filtro, realizando esto en cada una de las capas. Se puede empezar desde características simples como el nivel de brillo o los bordes de la imagen y crecer en complejidad hasta llegar a características que definen la forma de un objeto en particular.

Las capas realizan operaciones que modifican los datos, con el propósito de comprender sus características particulares. Las capas más comunes entre la entrada y salida son:

- **Convolución:** aplica un conjunto de filtros convolucionales a las imágenes de entrada y cada filtro activa una serie de características diferentes de las imágenes.
- **Unidad lineal rectificada (RELU):** mantiene los valores positivos y establece los negativos en cero, lo que ayuda a realizar un entrenamiento más rápido y eficaz, también es conocido como “activación”, pues solo las características activadas prosiguen a la siguiente capa.
- **Agrupación:** simplifica la salida mediante una reducción no lineal del muestreo, lo que disminuye el número de parámetros que la red debe aprender.

A comparación de una red neuronal tradicional, una CNN tiene pesos y valores de sesgos compartidos, que son los mismos para todas las neuronas ocultas de una capa determinada, lo que permite a todas las neuronas ocultas detectar las mismas características en diferentes regiones de la imagen. Esto hace que la red sea tolerante en la traducción de objetos en una imagen, un cuerpo puede ser reconocido en cualquier lugar que aparezca dentro de la imagen.

6.5. Especificaciones de cámaras

Las cámaras además de ser el medio principal para registrar los datos visuales, también influyen en la calidad, precisión y procesamiento de la información obtenida. La resolución, la velocidad de fotogramas y otros aspectos técnicos de las cámaras afectan significativamente la capacidad de los algoritmos de aprendizaje automático para detectar y seguir los movimientos de manera eficiente.

Cámara integrada en la computadora portátil:

- **Resolución:** 1280x720.
- **Megapíxeles:** 0.92 MP.
- **Calidad de imagen:** HD.
- **Tasa de fotogramas:** 30 fps.

Cámara web Logitech HD C270:

- **Resolución:** 720.
- **Megapíxeles:** 0.9 MP.
- **Calidad de imagen:** HD.
- **Tasa de fotogramas:** 30 fps.

6.6. FreeMoCap

FreeMoCap [2] es un proyecto de código abierto gratuito que proporciona una captura de movimiento sin marcadores y con cámaras web de costo mínimo para aquellos que desean realizar investigaciones, el cual utiliza aprendizaje automático a través de redes neuronales convolucionales para el registro con precisión de los movimientos en cuerpos humanoides.

Esta herramienta produce salidas de datos en forma de matrices numpy, CSV, escenas Blender y un archivo Jupyter que está configurado para realizar un análisis de los datos producidos. A pesar de que esta herramienta está hecha para lograr una captura de datos en cualquier lugar donde se pueda observar el cuerpo entero, se recomienda configurar espacios para obtener mejores grabaciones.

- **Condiciones de iluminación:** para obtener los mejores resultados, se recomiendan los entornos brillantes, más de lo que los ojos consideran como brillante, pues este ayudará a que la cámara tenga menos desenfoque de movimiento y facilitará la identificación de las articulaciones del individuo en cada cuadro de captura.
- **Condiciones del fondo:** a pesar de que utilizar un fondo de color sólido no es necesario para la toma de datos, usar uno puede ayudar a mejorar la calidad de captura. Mantener el ambiente libre de texturas complejas facilitará el seguimiento del cuerpo en la escena. Además, mantener un contraste entre sujeto y fondo permitirá que se destaque el cuerpo que se desea seguir. Otra recomendación, es utilizar ropa que se adapte al cuerpo para que se expongan de mejor manera las articulaciones.
- **Posición y configuración de la cámara:** en configuraciones de múltiples cámaras, colocarlas para que todas tengan en vista al sujeto es crítico. Para esto se recomienda que al menos dos o tres cámaras logren ver el cuerpo completo de manera simultánea en algún momento de la captura. Si hay cámaras demasiado juntas, no proporcionarán mucha información a la toma de datos, separarlos por un ángulo suficiente mejorará la triangulación. Asegurar que cada cámara comparta una vista de la placa ChArUco con otra durante la calibración de las posiciones hará un trabajo más eficiente.

6.7. ChArUco

ChArUco [8] es una palabra derivada de la palabra en inglés *chessboard*, que significa tablero de ajedrez, y de la palabra *ArUco* 3. Un marcador ArUco es un cuadro sintético compuesto por un borde negro ancho y una matriz binaria interna que determina su identificador (ID). El borde negro facilita una rápida detección de la imagen, mientras que la codificación binaria permite su identificación. El tamaño del marcador determina el de la matriz interna, un marcado de 4x4 se compone de 16 bits.

El tablero ChArUco facilita la detección rápida de esquinas y permite identificar de forma única las independientes de otras. La detección de esquinas que brindan estos tableros permiten obtener puntos en el mundo real cuyas mediciones son conocidas, y cuya correlación se puede utilizar para la calibración de equipos utilizados por diferentes máquinas para diferentes propósitos.

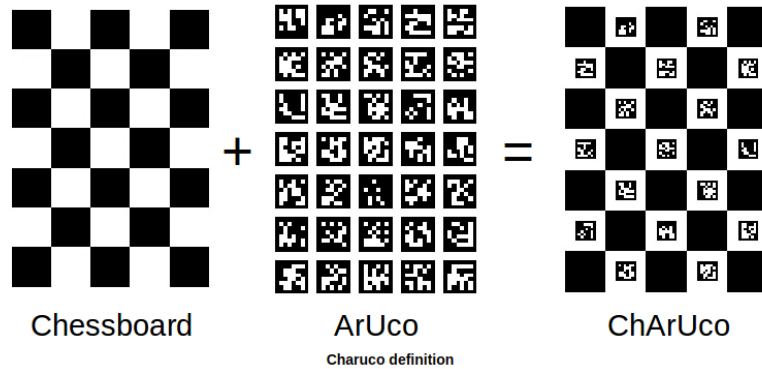


Figura 3: Tablero ChArUco [8].

6.8. Tracker

Tracker [9] es un programa de análisis y modelado de video gratuito basado en Física de Código Abierto (OSP por sus siglas en inglés), diseñado principalmente para su uso en la física. El cual realiza una combinación entre videos y el modelado por computadora. Entre las características de Tracker están:

- Seguimiento
 - Seguimiento manual y automatizado de objetos superpuestos y datos de posición, velocidad y aceleración.
 - Seguimiento de centro de masas puntuales.
 - Vectores interactivos
- Modelado
 - Creación de modelos cinemáticos y dinámicos de partículas de masa puntual y sistemas de dos cuerpos.
 - Las superposiciones de modelos se sincronizan y escalan automáticamente al video para una comparación visual directa con el mundo real.
- Video
 - El filtro de perspectiva corrige la distorsión cuando los objetos se fotografían en ángulo en lugar de en línea recta.
 - El filtro de distorsión radial corrige la distorsión asociada con las lentes.
- Generación y análisis de datos
 - Escala, origen e inclinación del sistema de coordenadas fijo o variable en el tiempo.
 - Múltiples opciones de calibración.
 - Cambio de centro de masa y otras referencias.
 - Herramienta de análisis de datos que incluye un potente ajuste de curva automático y manual.

6.9. Código abierto

El término código abierto u *open source* [10] en inglés, se refiere al acceso del código fuente de un programa, los términos de distribución para ser considerado como código abierto, debe cumplir con varios puntos propuestos por la organización Open Source Initiative [11].

Exploración de herramientas y análisis 2D

Durante estas últimas décadas las tecnologías emergentes para la captura de movimiento sin marcadores han ido incrementando. Estas herramientas ayudan a reducir los elementos que se necesitan aplicar para la captura de datos, en este capítulo se explorarán las diversas herramientas que existen actualmente con el objetivo de seleccionar la mejor opción entre estas.

7.1. Criterios de selección

Se consideraron varios criterios fundamentales para la selección de las herramientas de captura de movimiento sin marcadores, tales como: precisión en la detección de movimientos, uso de sistemas de aprendizaje automático, facilidad de uso, disponibilidad de documentación, soporte, viabilidad y acceso económico del programa. Además, se realizan análisis en 2D y 3D siendo flexibles en la diferencia, pues pueden haber herramientas con una alta calidad en la toma de datos en 2D mas no en 3D y viceversa. Cada herramienta encontrada fue evaluada en base a estos factores.

7.2. Herramientas evaluadas

7.2.1. Theia Markerless

Es la herramienta más utilizada por marcas y universidades a nivel mundial. Es muy precisa para capturar movimientos humanos, de interfaz intuitiva y un buen seguimiento por parte de los desarrolladores. A pesar de esto, se ha descartado ya que este solamente

ofrece una prueba de libre acceso por un tiempo limitado [12].

7.2.2. Move AI

Move AI [13] es una herramienta bastante utilizada. Cuenta con una buena precisión en la toma de datos, buen soporte y gran cantidad de documentación. Este programa requiere un mejor equipo que otras opciones y es totalmente de pago, por lo que fue descartado.

7.2.3. Captury

Un programa que se ha mantenido en un constante crecimiento. Brinda la opción de realizar los procesamientos en tiempo real o posterior. También permite la toma de datos para varios cuerpos simultáneamente. Debido al propósito de esta investigación, se ha descartado por el costo económico [14].

7.2.4. AR-51

AR-51 [15] ofrece la opción de realizar el procesamiento en tiempo real, con una gran precisión sin importar la claridad del cuerpo humano. Puede lograr la toma de datos con un equipo no tan sofisticado y mantienen la suavidad de los movimientos humanos. Este se excluyó de la investigación debido al incumplimiento del acceso gratuito.

7.2.5. Simi

Una opción poco favorable si es comparada a las demás herramientas, pues a pesar de ser una aplicación con más tiempo en la captura de movimiento sin marcadores y tener una gran precisión, esta mantiene poca documentación, poco seguimiento y no es de acceso libre [16].

7.2.6. iPi Soft

Este programa cumple con el requisito de ser accesible a cualquier usuario, si bien es una gran opción por su precisión en la captura de datos, se ha descartado debido a la necesidad de elementos específicos para lograr una buena toma de datos y requerir de otra aplicación para realizar los procesamientos adecuados en la toma de datos [17].

7.2.7. Remocapp

Remocapp [18] es una herramienta que está en constante desarrollo, con una buena precisión para capturar los movimientos de cuerpos humanoides y una interfaz bastante amigable para realizar el procesamiento. La herramienta contiene una versión gratuita, es por un tiempo limitado, lo que provocó su omisión.

7.2.8. FreeMoCap

Una aplicación de acceso libre, fácil de interactuar, con una buena documentación y un equipo que se mantiene en un seguimiento constante para el desarrollo de la herramienta. Cuenta con una gran precisión en la toma de datos, aunque su descarga puede ser algo complicada, debido a los resultados brindados y su capacidad de realizar el procesamiento sin un equipo de gran escala, ha sido seleccionada para su uso en la investigación [2].

7.3. Tabla de comparación

Herramienta	Facilidad de uso	Precisión	Documentación y soporte	Acceso
Theia Markerless	Alto	Alto	Alto	Pagado
Move AI	Alto	Alto	Alto	Pagado
Captury	Medio	Alto	Medio	Pagado
AR-51	Medio	Alto	Bajo	Pagado
Simi	Bajo	Alto	Bajo	Pagado
iPi Soft	Bajo	Medio	Bajo	Gratuito
Remocapp	Alto	Alto	Alto	Pagado
FreeMoCap	Alto	Alto	Alto	Gratuito

Cuadro 1: Comparación entre herramientas encontradas. Resumen de la evaluación para la selección de herramientas de captura de movimiento sin marcadores con aprendizaje automático.

Para validar la herramienta seleccionada (FreeMoCap) se realizaron pruebas específicas, en las cuales se utilizó una herramienta de configuración manual (Tracker) con la que se compararon los datos obtenidos. Se utilizó una configuración similar en cada prueba para mantener un mismo ambiente en cada toma de datos.

7.4. Configuración utilizada para la toma de datos

Las pruebas realizadas se hicieron dentro del ecosistema Robotat, con una cámara web Logitech C270 ubicada a 1 metro sobre el nivel de la base y a 4 metros de distancia hasta el cuerpo capturado, como se puede ver en las figuras 4, 5 y 6; esto se realizó para mantener un mismo fondo en ambas herramientas, y así observar la precisión de cada programa.

7.4.1. Prueba de movimiento lineal simple en eje X

En esta prueba se realizó una caminata de manera lineal, de izquierda a derecha de forma horizontal durante la primera parte del video, se da un giro en el extremo derecho del cuadro de video y nuevamente se realiza una caminata lineal, esta vez de derecha a izquierda. Esta captura de datos se obtuvo para medir la capacidad de la herramienta en su precisión para movimientos recurrentes en el eje X.

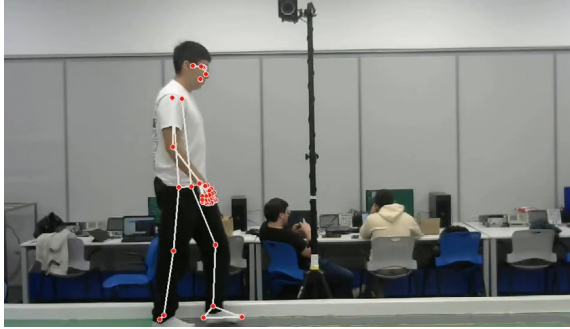


Figura 4: Prueba de movimiento a través de una caminata lineal para el análisis 2D.

7.4.2. Prueba de movimiento lineal simple en eje Y

Para esta prueba se realizaron tres saltos de pequeña magnitud, de manera lineal y vertical, evitando salir del recuadro que permite la cámara, de esta forma se realizó la medición de movimientos sobre el eje Y.

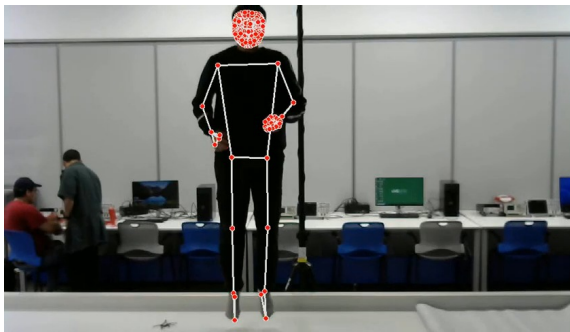


Figura 5: Prueba de movimiento a través de saltos verticales para el análisis 2D.

7.4.3. Prueba de movimiento curvilíneo

Durante esta toma de datos, se realizó un pequeño salto parabólico con la intención de combinar movimientos en ambos ejes.

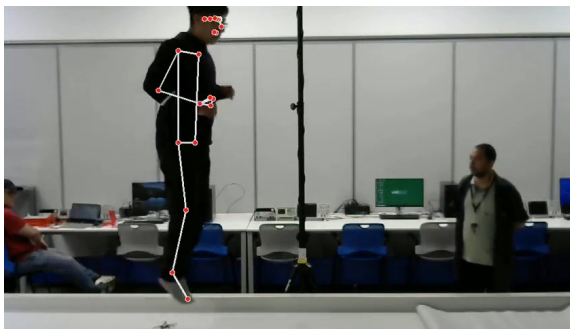


Figura 6: Prueba de movimiento a través de un salto parabólico para el análisis 2D.

7.5. Comparación

7.5.1. Configuración en FreeMoCap

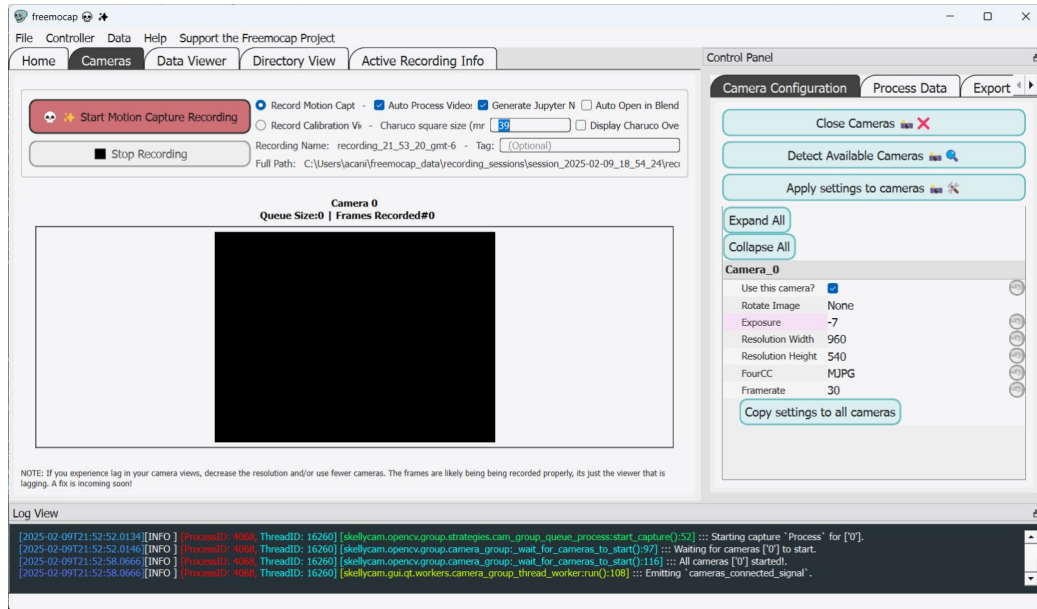


Figura 7: Configuración de la aplicación FreeMoCap para cada toma realizada.

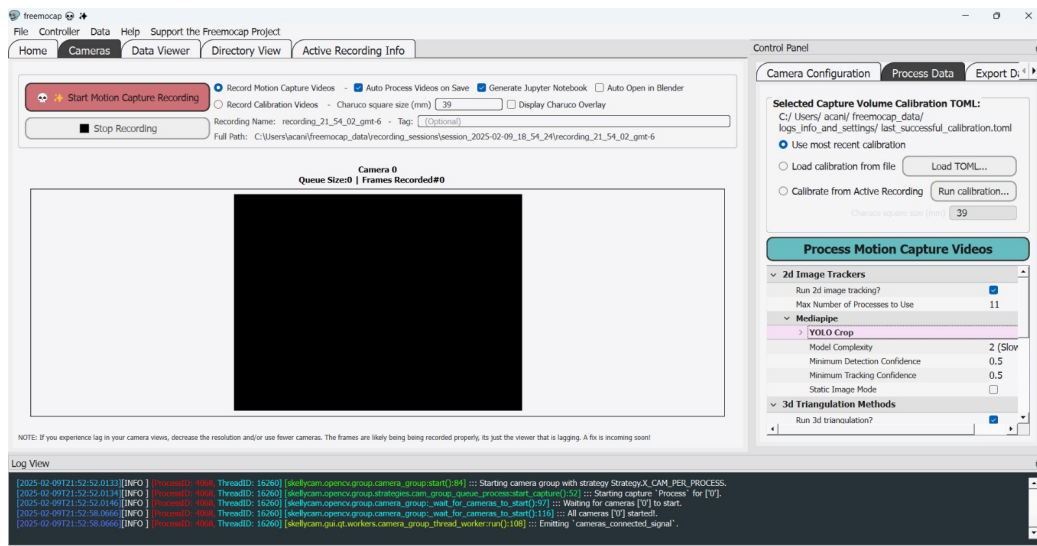


Figura 8: Configuración de la aplicación FreeMoCap para cada toma realizada.

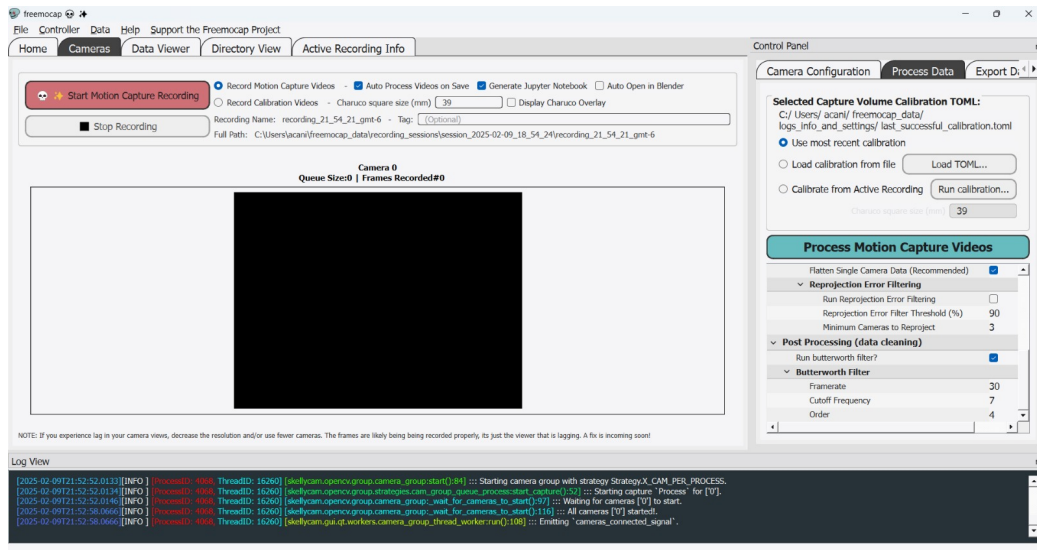


Figura 9: Configuración de la aplicación FreeMoCap para cada toma realizada.

La toma de datos en FreeMoCap, fue hecha con la configuración inicial, y recomendada por los creadores. En las figuras 7, 8, 9, se observa la configuración utilizada. Si el ambiente en el que se realizan las tomas de datos no cuenta con una buena iluminación, se recomienda ajustar la exposición, *exposure*, el cual de forma predeterminada es de -7.

7.5.2. Configuración en Tracker

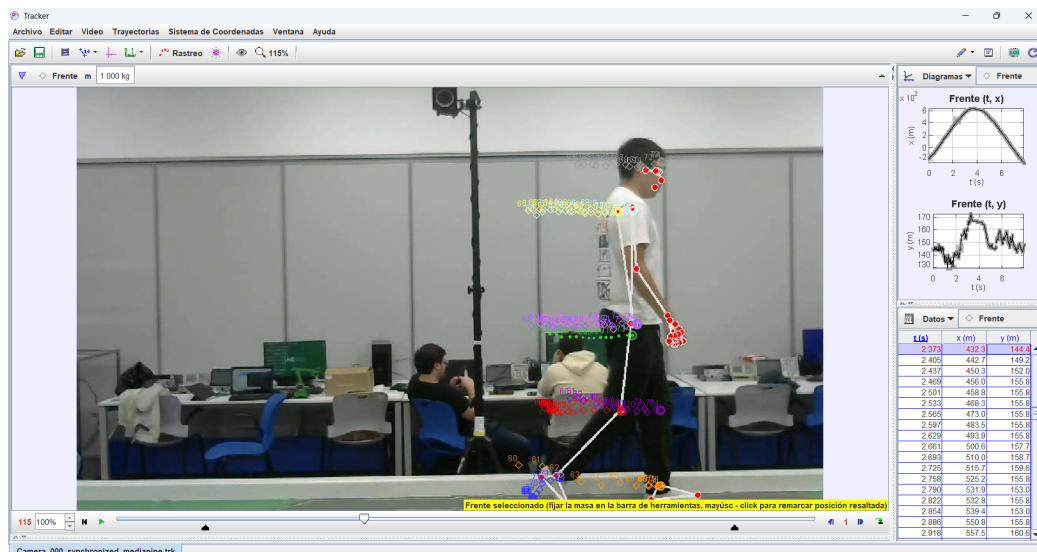


Figura 10: Configuración de la aplicación Tracker para cada toma realizada, ejemplo de la prueba de una caminata lineal para el análisis 2D.

Tras el procesamiento en FreeMoCap, se realizó la configuración manual en Tracker para la obtención de datos, en esta se siguieron los puntos clave (frente, hombro, codo,

muñeca, cintura, rodilla y tobillo) para realizar una comparación más estable entre ambas herramientas, como se muestra en la Figura 10. Los resultados obtenidos ayudaron a producir la media cuadrática, media aritmética, varianza y desviación estándar que logró una mejor comparación y análisis en la precisión de la captura del movimiento.

7.6. Resultados estadísticos

7.6.1. Prueba de movimiento lineal simple en eje X

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	387.99	274.03	7.5751e+04	275.23
Hombro derecho	377.03	264.45	7.2510e+04	269.28
Hombro izquierdo	391.09	275.08	7.7598e+04	278.56
Codo derecho	305.62	162.78	6.7178e+04	259.19
Codo izquierdo	229.62	96.36	4.3615e+04	208.84
Cintura derecha	384.50	271.96	7.4183e+04	272.37
Cintura izquierda	389.57	273.34	7.7358e+04	278.13
Muñeca derecha	376.18	256.34	7.6107e+04	275.87
Muñeca izquierda	389.51	274.80	7.6510e+04	276.60
Rodilla derecha	388.04	275.60	7.4920e+04	273.71
Rodilla izquierda	395.37	276.13	8.0394e+04	283.54
Pie derecho	391.46	278.63	7.5914e+04	275.52
Pie izquierdo	393.72	272.06	8.1326e+04	285.18

Cuadro 2: Estadística de los datos encontrados con Tracker sobre el eje X en la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	656.17	595.07	7.6753e+04	277.04
Hombro derecho	646.44	586.72	7.3939e+04	271.92
Hombro izquierdo	663.66	599.32	8.1587e+04	293.78
Codo derecho	642.90	582.35	7.4491e+04	272.93
Codo izquierdo	662.39	597.87	8.1641e+04	285.73
Cintura derecha	650.27	590.74	7.4179e+04	272.36
Cintura izquierda	660.11	597.28	7.9320e+04	281.64
Muñeca Derecha	645.49	585.71	7.3899e+04	271.84
Muñeca izquierda	657.97	594.58	7.9732e+04	282.37
Rodilla derecha	655.16	595.61	7.4776e+04	273.45
Rodilla izquierda	662.21	597.26	8.2132e+04	286.59
Pie derecho	659.41	599.29	7.5974e+04	275.63
Pie izquierdo	664.67	596.52	8.6308e+04	293.78

Cuadro 3: Estadística de los datos encontrados con FreeMoCap sobre el eje X en la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	150.91	150.58	102.11	10.11
Hombro derecho	80.30	80.16	23.67	4.87
Hombro izquierdo	81.79	81.39	65.93	8.12
Codo derecho	5.07	1.49	23.54	4.85
Codo izquierdo	3.41	0.01	11.71	3.42
Cintura derecha	63.42	-63.32	38.68	6.22
Cintura izquierda	65.55	-65.41	18.41	4.29
Muñeca derecha	62.70	-62.32	47.72	6.91
Muñeca izquierda	59.10	-58.38	85.17	9.23
Rodilla derecha	171.74	-171.55	65.67	8.10
Rodilla izquierda	172.84	-172.73	37.36	6.11
Pie derecho	268.73	-268.45	154.73	12.44
Pie izquierdo	266.38	-266.09	151.77	12.32

Cuadro 4: Estadística de los datos encontrados con Tracker sobre el eje Y en la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	106.70	-106.46	50.59	7.11
Hombro derecho	159.76	-159.70	20.56	4.53
Hombro izquierdo	158.91	-158.75	50.59	7.11
Codo derecho	238.95	-238.87	38.04	6.17
Codo izquierdo	238.40	-238.16	111.84	10.58
Cintura derecha	306.87	-306.80	44.04	6.64
Cintura izquierda	306.72	-306.64	47.28	6.88
Muñeca derecha	301.00	-300.91	58.12	7.62
Muñeca izquierda	298.13	-297.30	497.88	22.31
Rodilla derecha	409.87	-409.79	68.17	8.26
Rodilla izquierda	410.42	-410.36	45.83	6.77
Pie derecho	508.17	-508.02	152.86	12.36
Pie izquierdo	507.45	-507.29	167.71	12.95

Cuadro 5: Estadística de los datos encontrados con FreeMoCap sobre el eje Y en la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

Al evaluar las medias de los datos sobre el eje X obtenidos en Tracker, Cuadro 2, se puede apreciar una diferencia notable en varios de los puntos evaluados, lo que puede significar una variación en las mediciones. Esto es distinto entre las medias del resultado de FreeMoCap sobre el eje X, pues a pesar de que sí existe una diferencia apreciable, esta es menor. Al comparar la varianza y desviación estándar en los cuadros 2 y 3 podemos observar poca diferencia entre ambas, esto sugiere que ambas son bastante similares en las mediciones sobre el eje X.

Continuando con el Cuadro 4, observamos una mayor similitud entre sus medias, de

esta misma manera las medias descritas en el Cuadro 5, al tomarlas como absolutas, son bastantes similares. Esta condición puede ser causada por la prueba lineal horizontal, donde el eje Y no se ve tan afectado por la prueba. Comparando entre ambas tablas la varianza y desviación, nuevamente se puede observar como existe una gran similitud entre ambas herramientas. Gracias a esta prueba se puede determinar que FreeMoCap es un programa que puede suplir el uso de Tracker pues presenta resultados aceptables en las mediciones.

7.6.2. Prueba de movimiento lineal simple en eje Y

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	90.55	90.50	9.54	3.09
Hombro derecho	41.14	40.98	12.57	3.55
Hombro izquierdo	142.06	142.01	13.18	3.63
Codo derecho	19.19	18.56	24.27	4.93
Codo izquierdo	163.45	163.35	33.00	5.74
Cintura derecha	61.37	61.26	12.62	3.55
Cintura izquierda	122.15	122.12	9.02	3.00
Muñeca derecha	36.67	40.98	177.73	10.85
Muñeca izquierda	136.88	142.01	64.12	8.01
Rodilla derecha	60.35	60.08	32.13	5.67
Rodilla izquierda	125.33	125.14	48.10	6.94
Pie derecho	73.53	73.27	37.79	6.15
Pie izquierdo	117.37	117.30	14.87	3.86

Cuadro 6: Estadística de los datos encontrados con Tracker sobre el eje X en la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	410.26	410.24	9.80	3.13
Hombro derecho	360.11	360.09	10.16	3.19
Hombro izquierdo	460.84	460.83	11.94	3.46
Codo derecho	339.08	339.04	29.33	5.42
Codo izquierdo	480.87	480.85	20.90	4.57
Cintura derecha	382.42	382.41	10.61	3.26
Cintura izquierda	440.31	440.30	8.65	2.94
Muñeca derecha	354.14	353.97	127.06	11.27
Muñeca izquierda	458.33	458.28	48.36	6.95
Rodilla derecha	380.15	380.11	29.18	5.40
Rodilla izquierda	441.37	441.35	22.37	4.73
Pie derecho	392.04	391.99	37.25	6.10
Pie izquierdo	435.64	435.63	12.64	3.56

Cuadro 7: Estadística de los datos encontrados con FreeMoCap sobre el eje X en la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	187.03	184.62	907.11	30.12
Hombro derecho	100.66	96.47	835.61	28.91
Hombro izquierdo	142.06	97.90	899.11	29.99
Codo derecho	39.72	23.61	1.0298e+03	32.09
Codo izquierdo	39.51	22.63	1.0593e+03	32.55
Cintura derecha	61.07	-55.19	690.57	26.28
Cintura izquierda	60.26	-54.12	709.11	26.63
Muñeca derecha	50.95	-37.24	1.2200e+03	34.93
Muñeca izquierda	49.82	-26.26	1.8094e+03	42.54
Rodilla derecha	167.47	-166.11	458.38	21.41
Rodilla izquierda	163.22	-161.93	423.17	20.57
Pie derecho	257.93	-257.52	215.55	14.68
Pie izquierdo	258.47	-258.04	224.18	14.97

Cuadro 8: Estadística de los datos encontrados con Tracker sobre el eje Y en la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	83.01	-77.01	968.34	31.12
Hombro derecho	146.13	-143.01	910.99	30.18
Hombro izquierdo	144.39	-141.19	921.97	30.36
Codo derecho	221.12	-218.78	1.0392e+03	32.24
Codo izquierdo	218.87	-216.53	1.0256e+03	32.03
Cintura derecha	294.03	-292.88	685.75	26.19
Cintura izquierda	293.13	-292.00	670.15	25.89
Muñeca derecha	273.61	-271.27	1.2888e+03	35.90
Muñeca izquierda	261.54	-258.09	1.8096e+03	42.54
Rodilla derecha	404.72	-404.31	337.29	18.37
Rodilla izquierda	402.07	-401.64	353.37	18.80
Pie derecho	497.95	-497.79	161.51	12.71
Pie izquierdo	496.54	-496.37	174.90	13.23

Cuadro 9: Estadística de los datos encontrados con FreeMoCap sobre el eje Y en la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

Observando los datos de las medias en los cuadros 6 y 7 existe una poca variación, significando una buena precisión en la toma de datos en ambas herramientas. Cuando se toma en cuenta la desviación y la varianza entre estos cuadros, también es apreciable una gran semejanza entre estas.

Evaluando los cuadros 8 y 9 también fue posible apreciar una diferencia, que aunque no es tan mínima como en los cuadros anteriores, esta no es tan grande y no implica una gran variación. Sin embargo, en el Cuadro 9 se observó una menor diferencia en los valores absolutos de las medias, a comparación del Cuadro 8. Respecto a la varianza y la desviación

estándar, la diferencia entre ambos cuadros también es poco relevante, pues existen valores que cambian por pocas unidades. Después de esta evaluación, fue posible concluir que el uso de la herramienta FreeMoCap es aceptable para las situaciones con movimientos en el eje Y, además de que este devuelve curvas más suaves y filtradas que una configuración manual.

7.6.3. Prueba de movimiento curvilíneo

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	157.63	82.20	1.8303e+04	135.29
Hombro derecho	137.37	81.77	1.9021e+04	137.92
Hombro izquierdo	134.91	78.80	1.6401e+04	128.07
Codo derecho	144.27	-21.89	2.0573e+04	143.43
Codo izquierdo	128.23	28.52	1.5815e+04	125.76
Cintura derecha	141.10	-11.25	2.0014e+04	141.47
Cintura izquierda	134.88	15.10	1.8175e+04	134.81
Muñeca derecha	144.67	9.63	2.1083e+04	145.20
Muñeca izquierda	139.06	60.77	1.5830e+04	125.82
Rodilla derecha	138.74	11.22	1.9348e+04	139.10
Rodilla izquierda	137.45	37.92	1.7660e+04	132.89
Pie derecho	146.47	-7.23	2.1653e+04	147.15
Pie izquierdo	141.38	9.69	2.0129e+04	141.88

Cuadro 10: Estadística de los datos encontrados con Tracker sobre el eje X en la prueba de movimiento curvilíneo.

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	398.63	374.77	1.8669e+04	136.63
Hombro derecho	353.44	325.36	1.9285e+04	138.87
Hombro izquierdo	378.17	355.88	1.6559e+04	128.68
Codo derecho	332.96	299.54	2.1387e+04	146.24
Codo izquierdo	366.09	343.76	1.6037e+04	126.64
Cintura derecha	334.12	303.13	1.9980e+04	141.35
Cintura izquierda	354.08	327.77	1.8155e+04	134.74
Muñeca derecha	357.52	326.95	2.1172e+04	145.51
Muñeca izquierda	388.72	369.44	1.4790e+04	121.61
Rodilla derecha	354.27	325.98	1.9466e+04	139.52
Rodilla izquierda	369.14	345.53	1.7076e+04	130.67
Pie derecho	342.75	309.66	2.1844e+04	147.79
Pie izquierdo	354.63	325.31	2.0172e+04	142.03

Cuadro 11: Estadística de los datos encontrados con FreeMoCap sobre el eje X en la prueba de movimiento curvilíneo.

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	149.37	141.92	2.1976e+03	46.88
Hombro derecho	92.67	81.77	1.9242e+03	43.87
Hombro izquierdo	88.40	78.80	1.6235e+03	40.29
Codo derecho	51.38	8.97	2.5895e+03	50.89
Codo izquierdo	41.91	12.31	1.6239e+03	40.30
Cintura derecha	69.05	-62.12	918.97	30.31
Cintura izquierda	65.76	-59.81	756.64	27.51
Muñeca derecha	76.27	-50.06	3.3497e+03	57.88
Muñeca izquierda	60.89	-27.09	3.0082e+03	40.29
Rodilla derecha	168.87	-164.38	500.28	22.37
Rodilla izquierda	160.62	-159.47	372.38	19.30
Pie derecho	268.58	-267.84	398.11	19.95
Pie izquierdo	257.73	-257.18	289.29	17.01

Cuadro 12: Estadística de los datos encontrados con Tracker sobre el eje Y en la prueba de movimiento curvilíneo.

	Media Cuadrática	Media Aritmética	Varianza	Desviación Estándar
Cabeza	121.14	-111.75	2.2140e+03	47.05
Hombro derecho	162.05	-155.67	2.0507e+03	45.28
Hombro izquierdo	168.37	-163.17	1.7431e+03	41.75
Codo derecho	236.26	-231.06	2.4567e+03	49.57
Codo izquierdo	237.73	-234.18	1.6969e+03	41.19
Cintura derecha	302.93	-301.47	895.89	29.93
Cintura izquierda	301.97	-300.64	810.70	28.47
Muñeca derecha	291.03	-285.19	3.4059e+03	58.36
Muñeca izquierda	274.31	-268.91	2.9684e+03	54.48
Rodilla derecha	408.82	-408.12	573.11	23.94
Rodilla izquierda	398.96	-398.42	433.22	20.81
Pie derecho	506.61	-506.21	403.25	20.08
Pie izquierdo	492.56	-492.20	358.83	18.94

Cuadro 13: Estadística de los datos encontrados con FreeMoCap sobre el eje Y en la prueba de movimiento curvilíneo.

Cuando se estudió la media cuadrática y la media aritmética presentes en el Cuadro 10 se observa como estas poseen una gran diferencia a comparación de las que están presentes en el Cuadro 11, ya que en este se mantienen valores más constantes, sugiriendo que FreeMocap logró una mejor precisión y poca variabilidad en la toma de datos que la configuración manual realizada en Tracker. Además, fue posible ver que entre los cuadros 10 y 11 la varianza junto con la desviación estándar son bastantes parecidas, consiguiendo un análisis bueno en el eje X.

Por otro lado, tanto en el Cuadro 12 como en el Cuadro 13 la diferencia de medias fue

semejante. Mientras que su varianza y desviación estándar siguen manteniendo la misma tendencia de similitud. Nuevamente, esta prueba agregó otro resultado positivo para el uso de FreeMoCap como herramienta sustituto, manteniendo una buena precisión en sus datos y logrando la captación de varios movimientos en un plano.

Aunque los resultados estadísticos brindaron un resultado numérico que pudo ser discutido, estos no mostraron una total comparación para validar la herramienta, por esto se realizó una comparación cualitativa.

En todas las pruebas se compararon las gráficas obtenidas por cada punto. Como se podrá observar, entre FreeMoCap y Tracker existe un desplazamiento en las escalas, por lo que en gráficas siguientes se sobrepusieron para observar de mejor manera la diferencia y tendencias de comportamiento.

7.7. Resultados cualitativos

7.7.1. Prueba de movimiento lineal simple en eje X

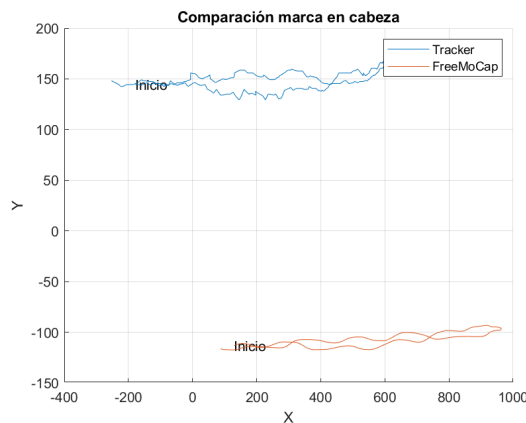


Figura 11: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cabeza de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

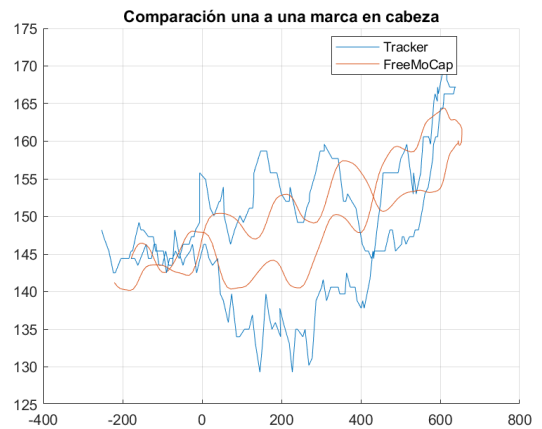


Figura 12: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cabeza de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

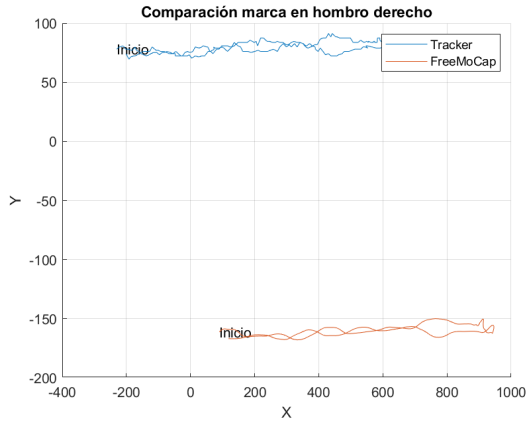


Figura 13: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

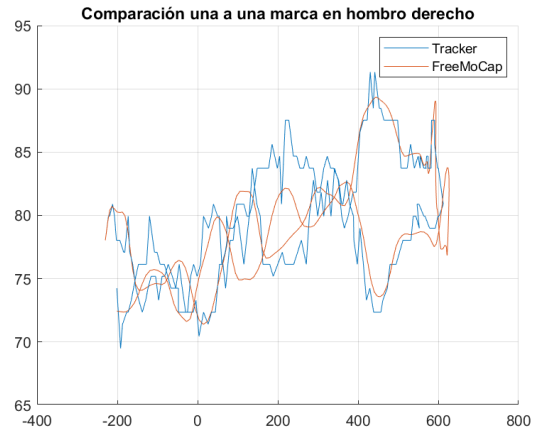


Figura 14: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

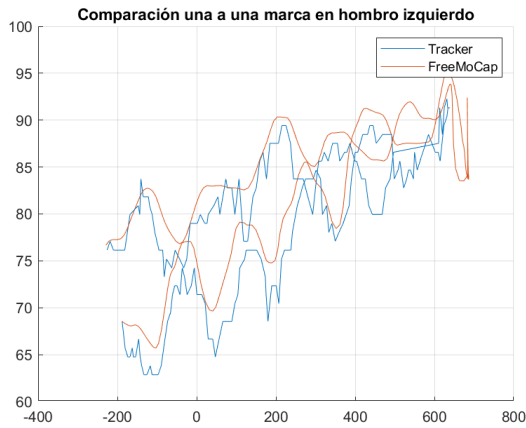


Figura 15: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

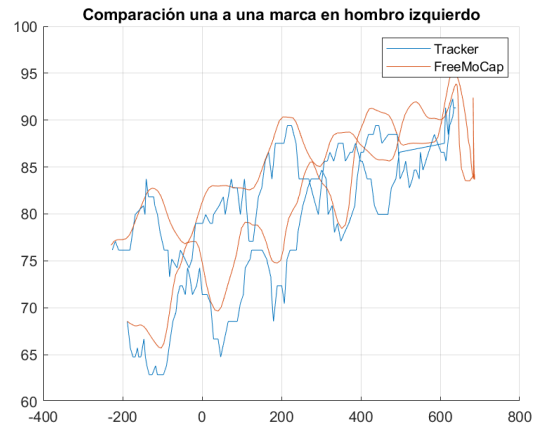


Figura 16: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

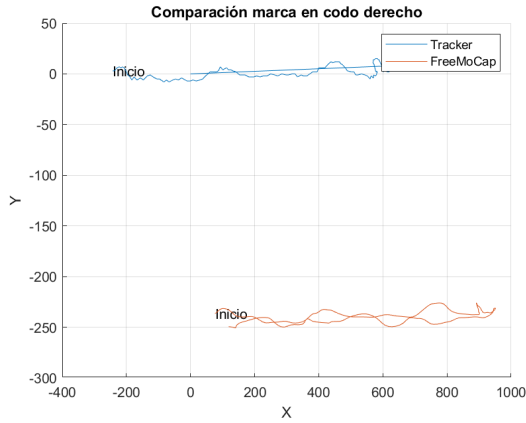


Figura 17: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

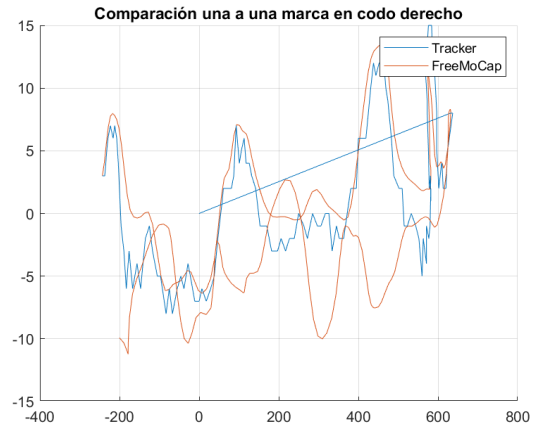


Figura 18: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

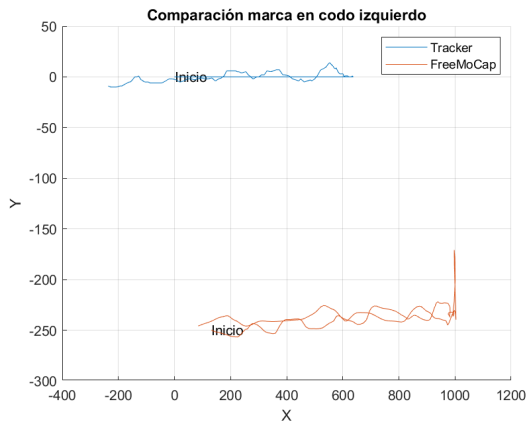


Figura 19: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.



Figura 20: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

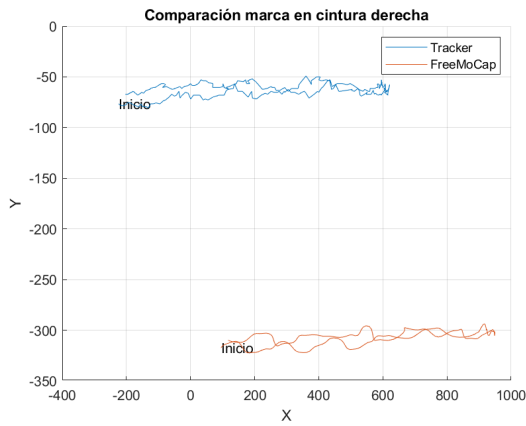


Figura 21: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

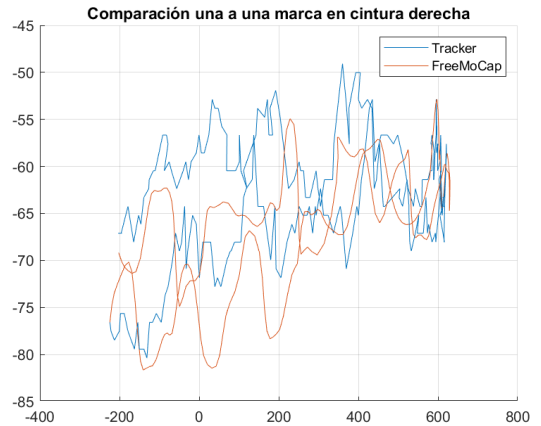


Figura 22: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

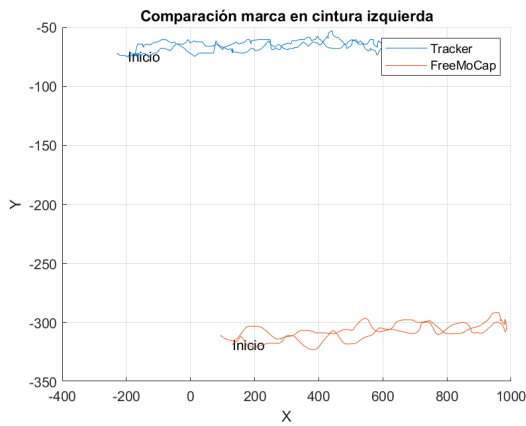


Figura 23: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

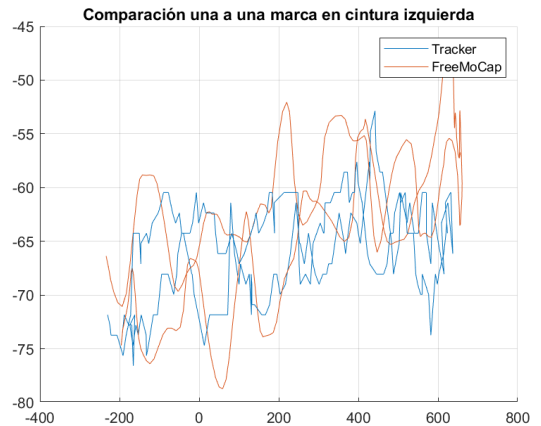


Figura 24: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

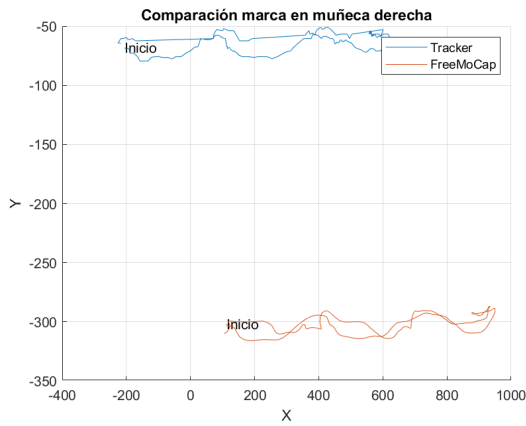


Figura 25: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.



Figura 26: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

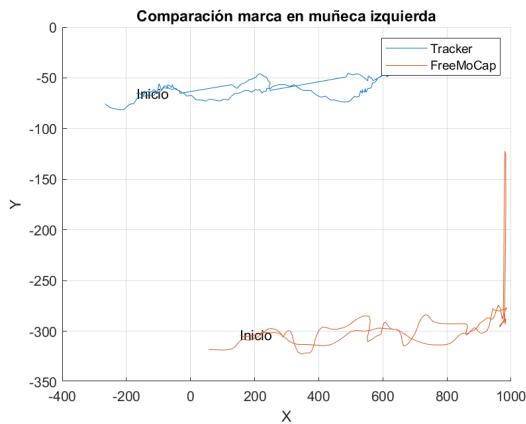


Figura 27: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

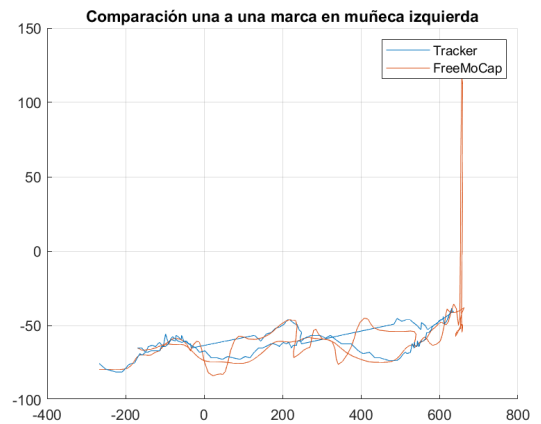


Figura 28: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

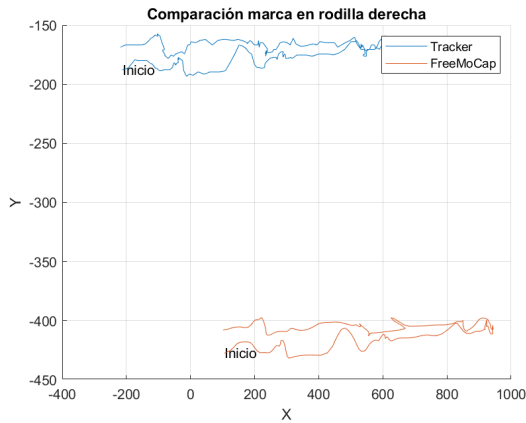


Figura 29: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

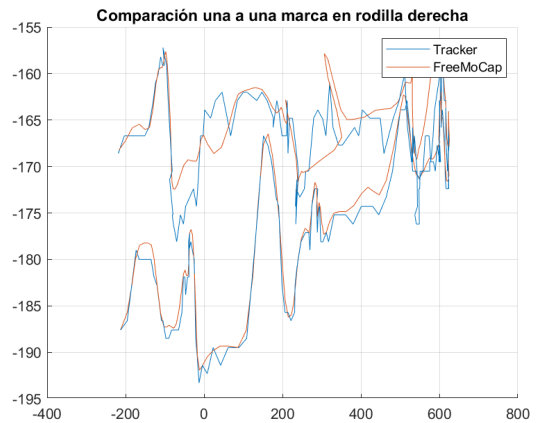


Figura 30: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

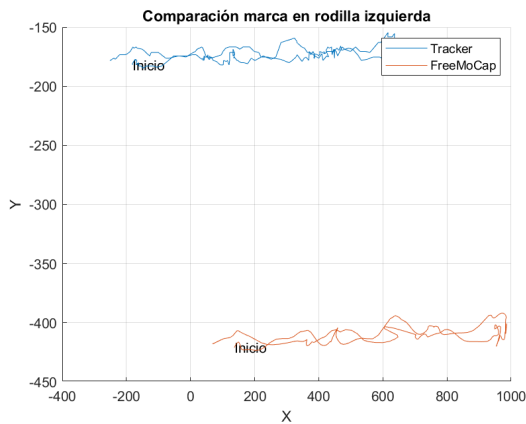


Figura 31: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

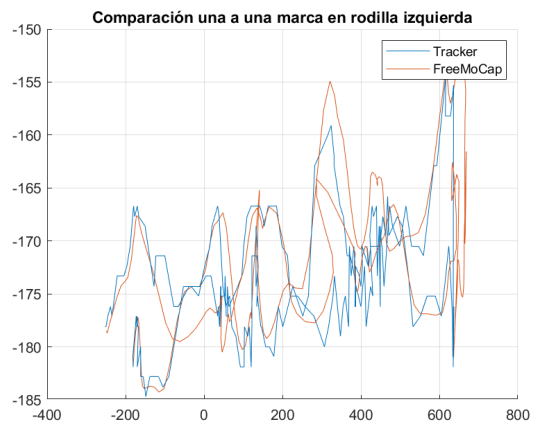


Figura 32: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

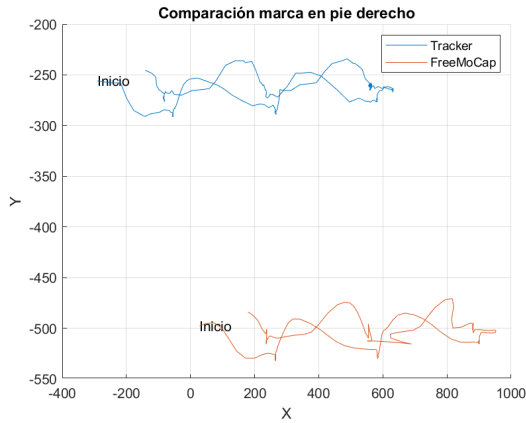


Figura 33: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

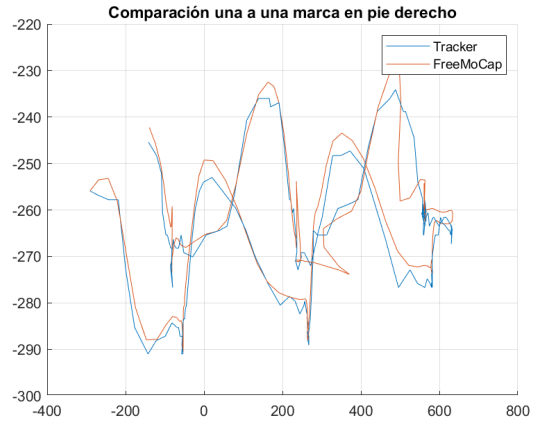


Figura 34: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

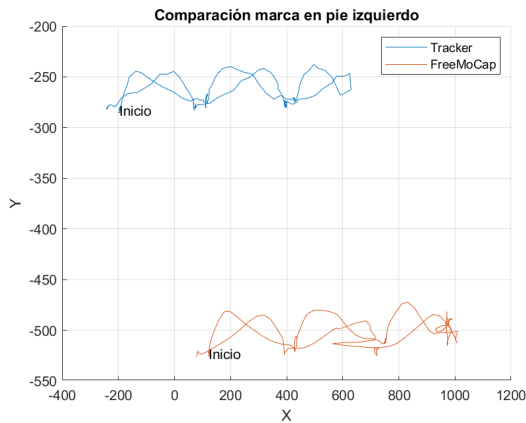


Figura 35: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

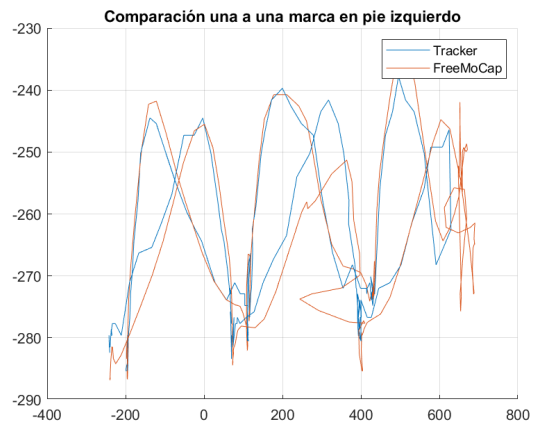


Figura 36: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

Para el seguimiento de trayectoria del punto en la cabeza, se puede observar como en ambas herramientas el comportamiento del recorrido es muy parecido 11. Aunque al colocarlas en un mismo nivel 12 es apreciable como FreeMoCap tiene menor alteración respecto al eje Y. En los puntos con oscilaciones también se observan picos en la configuración manual que no son observables por su contraparte, esto es gracias a que FreeMoCap incluye filtros para aumentar la suavidad y hacer la captura más semejante a los movimientos suaves que son característicos en los cuerpos humanos.

Aunque se puede observar una distorsión en los puntos arriba de 600 en el eje X en la gráfica de FreeMoCap, esto puede deberse a falsas capturas en los momentos cuando la cámara no detecta la cabeza. Sin embargo, esto no afectó en gran medida el comportamiento que ya presentaba y que terminó por mantener.

Al comparar el punto del hombro derecho, se puede observar nuevamente en la Figura

13 un comportamiento bastante similar en ambas herramientas. Esta trayectoria también se pudo observar de mejor manera en la Figura 14. Comparando con lo visto en la marca de la cabeza, en esta ocasión los puntos arriba de 400 y los que están por debajo de 100 en el eje X, mantienen un mayor parecido entre los dos programas. A diferencia de los puntos que se encuentran en el medio, el comportamiento llega a diferir bastante, el cual si se analiza en el tiempo, pertenece a los momentos en los que el hombro derecho no era visible. La discrepancia de este intervalo entre ambas capturas de datos se debe principalmente en la predicción de movimiento del aprendizaje automático dentro de FreeMoCap, ya que la aplicación de Tracker mantiene una captura lineal que no es comparable.

Los puntos ubicados a la izquierda del cuerpo son los que menos se lograron percibir durante la primera mitad de la toma de datos, pues no eran visibles desde la ubicación de la cámara. En la Figura 15 se observa una misma trayectoria, pero que difiere en el retorno, el cual es más apreciable en la Figura 16, donde los puntos mayores de 500 en X de la gráfica devuelta por FreeMoCap muestran más agitación. Ya que estos puntos pertenecen al momento en el cual varias partes del cuerpo salen de cámara, el pronóstico de movimiento no favorece a la muestra.

Sin embargo, los puntos restantes llegaron a ser demasiados similares en cuanto a comportamiento, aunque existió un mínimo desfase entre ambas herramientas, las oscilaciones y gradas llegaron a ser de una magnitud parecida y con la suavidad característica de los filtros que se aplican desde el procesamiento.

En la Figura 17 se observó un problema durante la segunda parte de la prueba, puesto que el codo derecho al no estar visible y mantener un movimiento menos distintivo fue más difícil de ubicar con la herramienta de configuración manual. Cuando comparamos ambas gráficas como en la Figura 18 se puede observar como el comportamiento y magnitudes de la trayectoria es más parecido a las vistas en anteriores marcas. Aunque es distinguible cómo difieren por muy poco en los puntos entre 500 y 600 en el eje X, esta parte es casi insignificante a comparación del resto.

Si bien con Tracker no se puede predecir el movimiento del codo, FreeMoCap ya demostró una buena predicción del movimiento corporal, la cual en esta ocasión es nuevamente observable. A pesar de no tener la comparativa con la otra herramienta, las oscilaciones fueron bastantes parecidas a las obtenidas durante la primera parte de la toma.

Esta vez, en la Figura 19 se pudo observar un pico en el momento de pérdida del cuerpo, el cual ya fue explicado. A pesar de que también lucen ser análogas entre sí, al analizarlo como en la Figura 20, demostraron un problema que no se había observado anteriormente, el cual radicó no solo en la dificultad de predicción durante el primer trayecto, momento donde no es apreciable el codo, sino que también se pudo observar como en la magnitud y en gran parte del comportamiento difirieron en gran manera. Puede que esto haya sido ocasionado por los datos tomados en el segundo trayecto, en los cuales la configuración manual fue poca precisa y lineal. Mientras que, FreeMoCap otra vez demostró una buena predicción de movimiento basada en aprendizaje automático.

En las figuras 21, 22, 23 y 24 se ven más diferencias al analizar los valores entre 0 y 400 en X. Aunque existen picos que pareciesen ser del mismo movimiento, estos tienen un desfase más marcado en magnitud.

De esta misma manera, se pudo observar que en los valores arriba de 500 en X el comportamiento y magnitud es muy similar, así como los valores menores de 0 en X, los cuales si demostraron un comportamiento más afín entre ambas gráficas. Como se observa en la Figura 4, la holgura perteneciente a la vestimenta utilizada pudo afectar en la detección y ubicación real de la cintura, que al estar en movimiento, la capacidad predictiva de FreeMo-Cap llega a confundir.

Se apreció en la Figura 25 que durante la segunda mitad de la toma, con la herramienta de configuración manual, en los instantes que no se tuvo certeza de la ubicación, este rellena estos datos como un movimiento lineal. Tanto en la Figura 27 y Figura 28 se pudo apreciar la diferencia con las trayectorias antes de la mitad de la muestra. Además se observó un salto extraño después del valor 600 en X, momento de salida del sujeto en el recuadro. Contrariamente a los problemas presentados, en la segunda mitad, el comportamiento de la trayectoria y la magnitud de las oscilaciones llegaron a parecerse en casi todo el recorrido.

La comparación en las figuras 30 y 32, mostró con una gran claridad como hasta el momento es el punto en donde más semejanzas existen, observables en la primera parte, en las cuales la definición de la curva llegó a ser casi idéntico por momentos. Aunque esto también se ve en la segunda parte, podemos ubicar un punto, específicamente ubicado entre los valores 300 y 400 en X, -170 y -160 en Y, el cual pareció perder la continuidad del movimiento ejecutado por la rodilla derecha.

Esto significó un problema, pues al perder la trayectoria los puntos siguientes no coincidieron hasta llegar a otra curva visible, en donde nuevamente se asemejó a la muestra obtenida con Tracker. No obstante, de ser la que más semejanzas tienen entre ambas herramientas, a surgido un error que no había sido notable de tal manera.

En las figuras 33, 34, 35 y 36 , los puntos de la segunda parte de la muestra, entre 150 y 400 en X, fueron los que más diferencias tuvieron entre gráficas. Mencionando también el momento que la marca no fue registrada dentro del cuadro de la cámara, puntos arriba de 600 en X. Así mismo, en los primeros valores mencionados, existió el error que fue visto en las marcas de las rodillas.

7.7.2. Prueba de movimiento lineal simple en eje Y

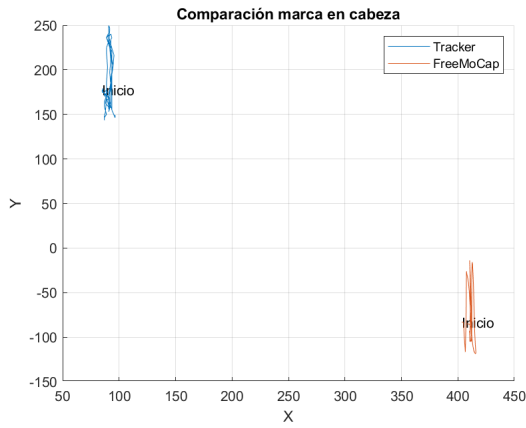


Figura 37: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cabeza de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

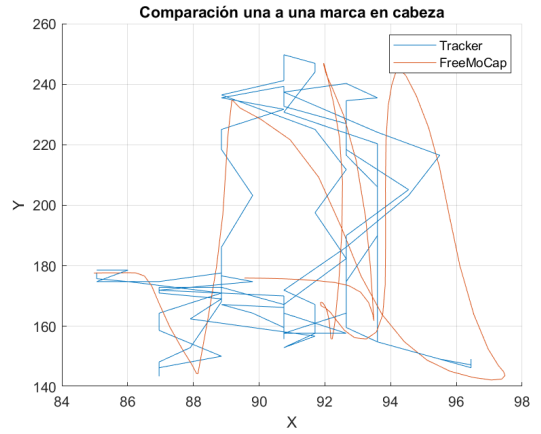


Figura 38: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cabeza de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

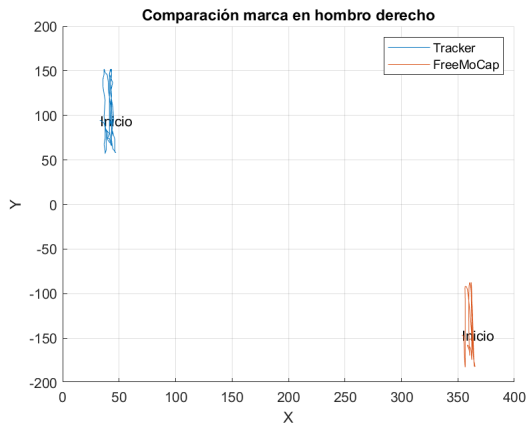


Figura 39: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

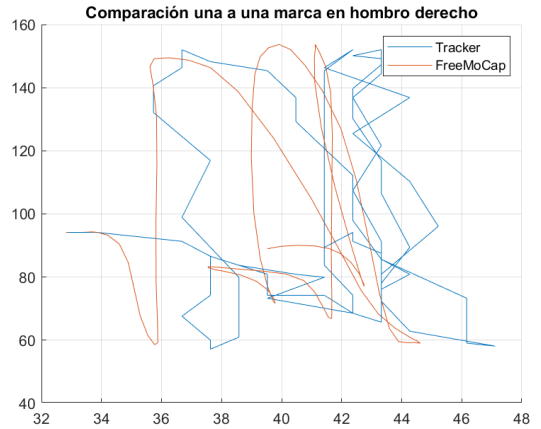


Figura 40: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

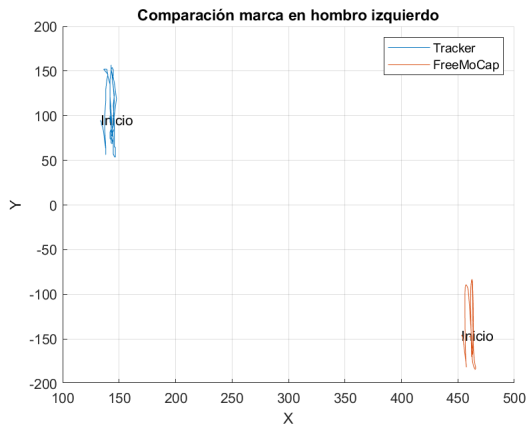


Figura 41: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

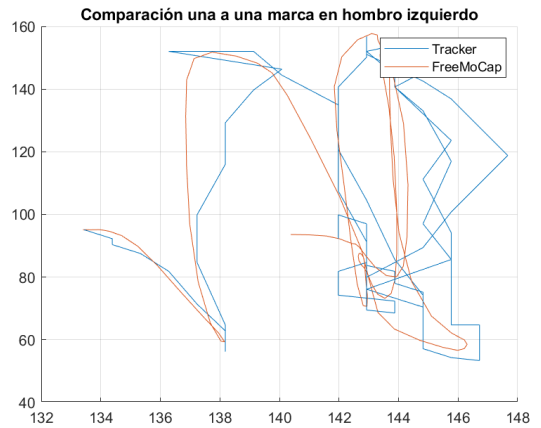


Figura 42: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

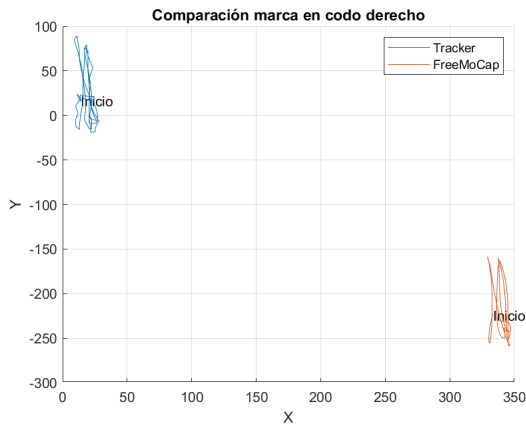


Figura 43: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

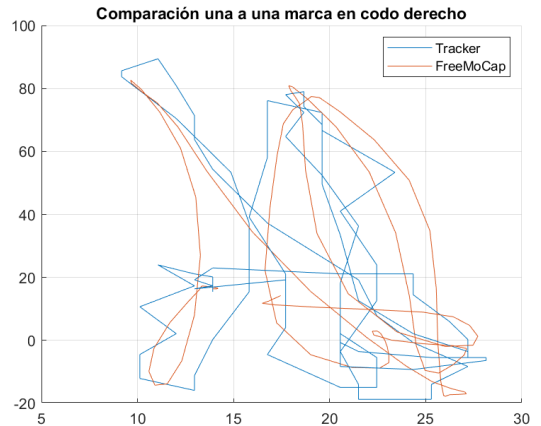


Figura 44: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

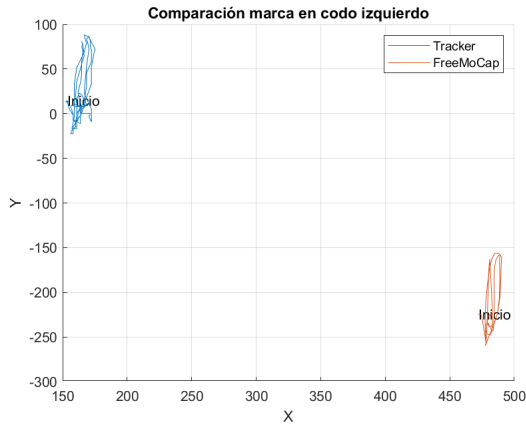


Figura 45: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

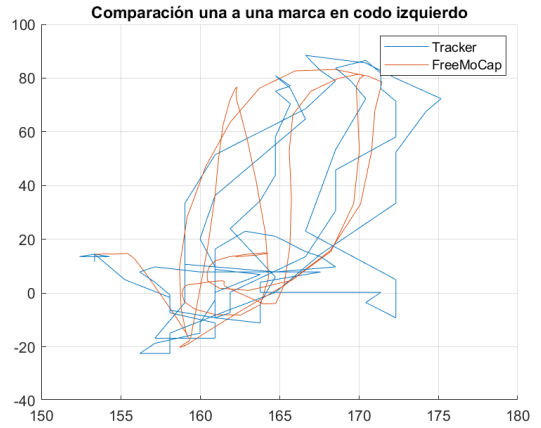


Figura 46: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

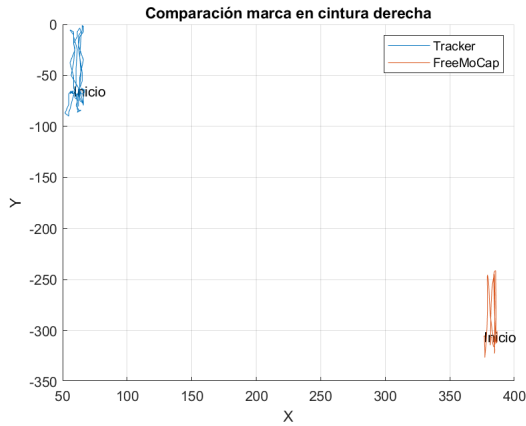


Figura 47: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

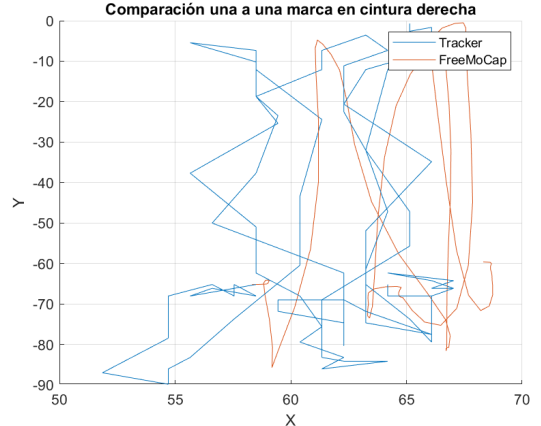


Figura 48: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

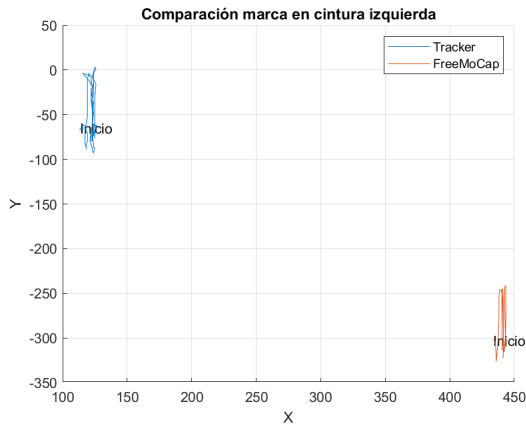


Figura 49: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

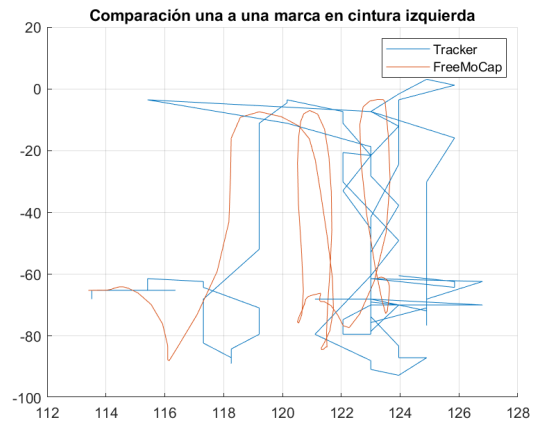


Figura 50: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

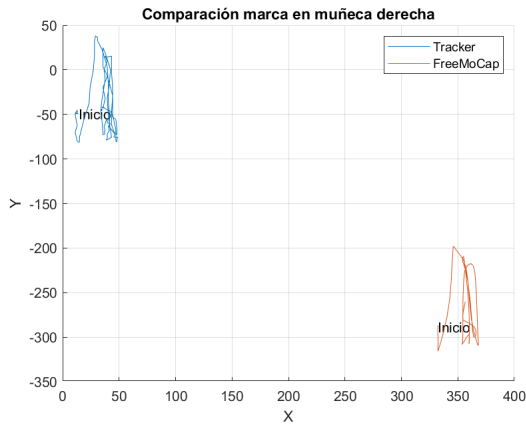


Figura 51: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

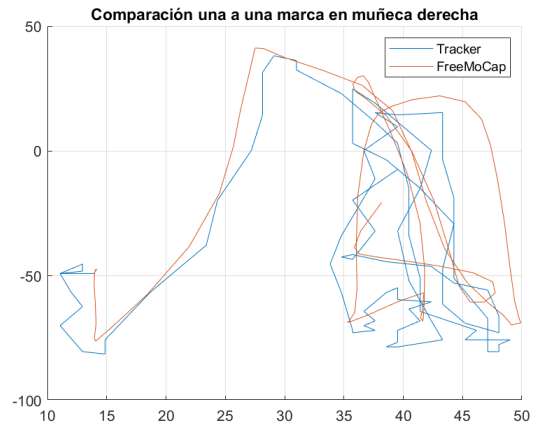


Figura 52: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

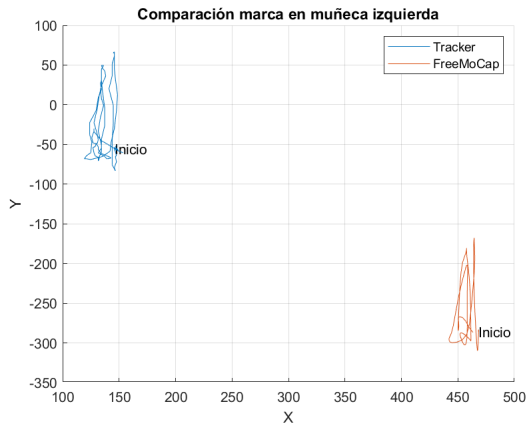


Figura 53: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

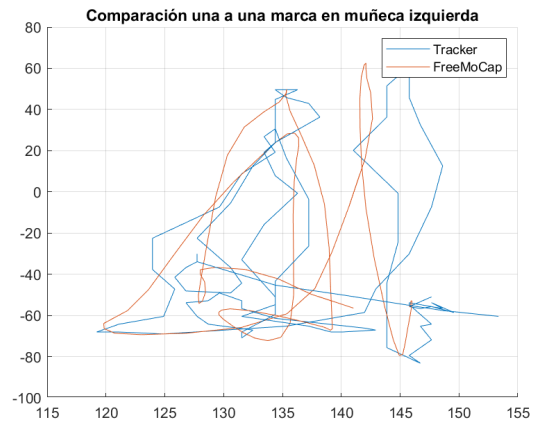


Figura 54: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

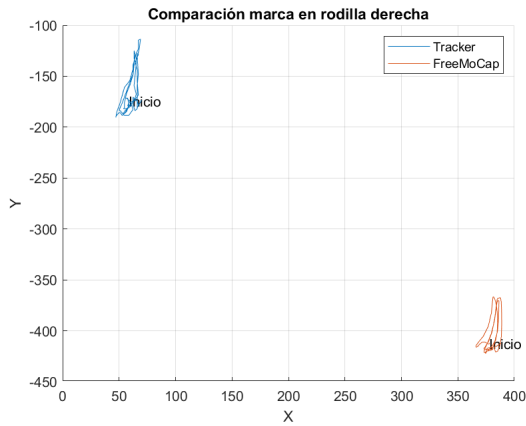


Figura 55: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

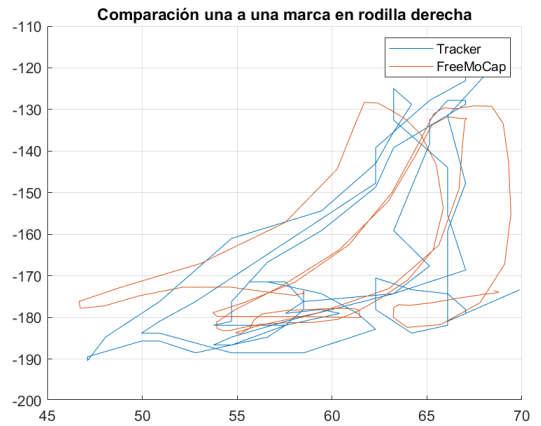


Figura 56: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

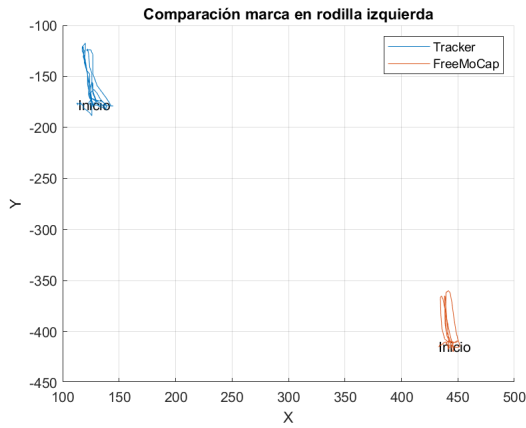


Figura 57: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

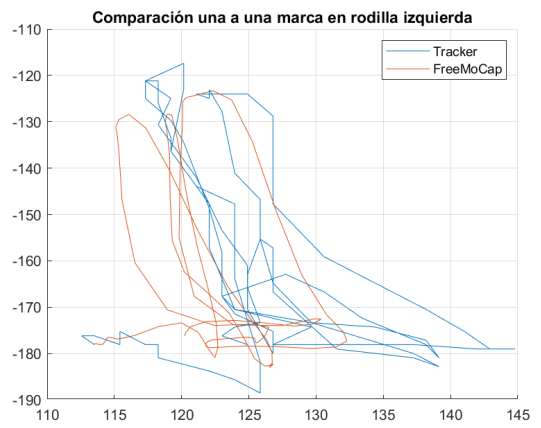


Figura 58: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

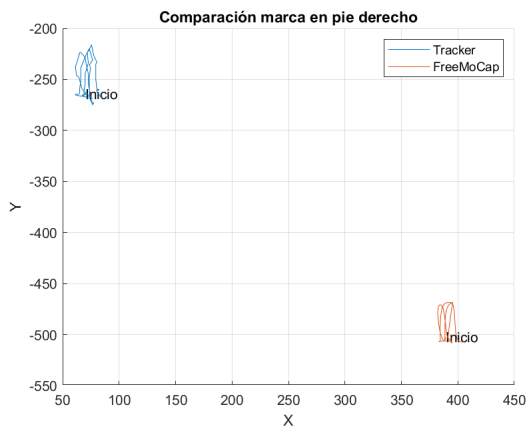


Figura 59: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

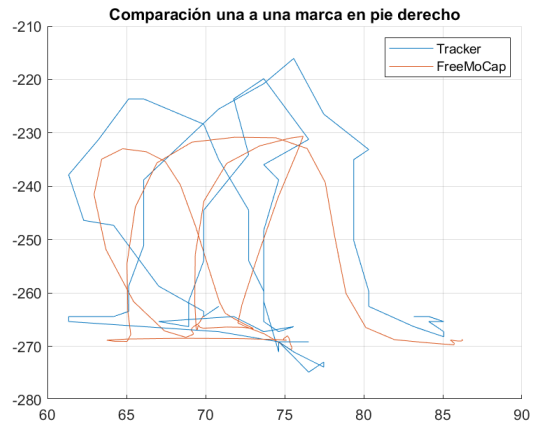


Figura 60: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

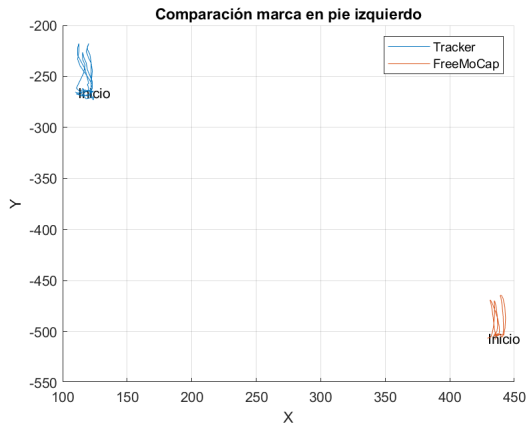


Figura 61: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

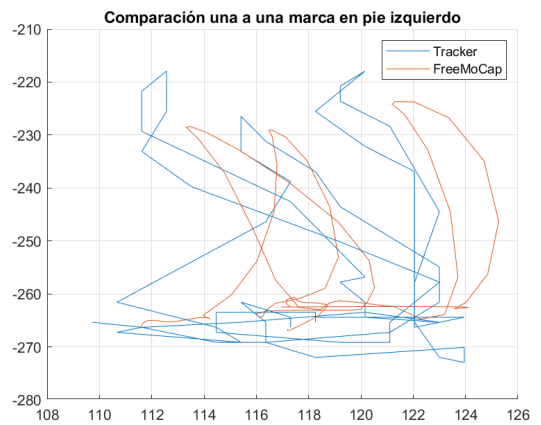


Figura 62: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento lineal simple en eje Y.

Si se analiza a detalle la Figura 38 es fácilmente apreciable como las curvas de impacto y del punto en Y más alto alcanzado, mantuvieron una turbulencia más suave a la que se alcanza con la configuración manual de Tracker. Ya que la Figura de los datos obtenidos en Tracker no son fácilmente distinguibles, sólo podemos comparar puntos en donde los picos coinciden, que posteriormente se observan valores con bastante discrepancia entre ambos. Otro asunto a discutir, es el punto atípico visto aproximadamente 92 en X, 170 en Y, el cual no mantiene el movimiento natural que se esperaría pues ocurre un pico inesperado, que aunque no sea tan abrupto, irrumpe en la precisión del seguimiento de trayectoria.

En las figuras 40 y 42, se puede apreciar esta vez con mayor facilidad el comportamiento de los datos en Tracker, el cual en la primera curva pareciese tener el mismo recorrido, aunque con un pequeño desfase, que el obtenido con FreeMoCap. De mismo modo, la punta ubicada en los valores 44 en X, 60 en Y por parte de la gráfica FreeMoCap y la punta de Tracker en los valores 47 en X, 60 en Y, es muy parecida. Gracias a la capacidad predictiva del aprendizaje automático, se ve una suavidad y una trayectoria que hace más sentido al movimiento provocado para la captura de datos.

Analizando la Figura 44 se observa como los puntos menores de 20 en X mantuvieron una magnitud y recorrido similar, aunque las igualdades entre estas pareciesen desaparecer pasados estos valores, aún existen algunos momentos distinguibles, especialmente en sitios mayores a 60 en Y. La poca claridad entre ambas gráficas no permitió realizar más comparaciones, a pesar de que hay instantes en donde parecen coincidir en valores, que bien permitieron suponer una buena captura. Un comportamiento que ha aparecido en las figuras, es que la gráfica proveniente de Tracker tiende a ser mayor en valores dentro de X que la devuelta por FreeMoCap.

Dentro de la Figura 48, se ve hasta el momento la toma que más desemejanzas tiene. Pues si bien se observó en los puntos altos, pertenecientes a los momentos del salto, no se observaron coincidencias en los valores de X. Como se mencionó en la toma de la prueba de movimiento lineal simple en eje X, cintura derecha, la ropa puede influenciar a la predicción y a la captura de la pose del esqueleto. Pues en esta ocasión el sujeto porta una vestimenta

oscura, cual puede ser el causante de la gran diferencia observable en esta ocasión.

A diferencia de su opuesto, la marca en la cintura izquierda, Figura 50, parece mejorar la similitud entre ambas herramientas. Si bien Tracker volvió a demostrar su poca versatilidad para comportarse de forma más suave, se ven curvas que recorren un camino similar en ambas.

Como se observa en las figuras 52 y 53, se observó que la primera curva es bastante parecida, y las siguientes buscan una misma tendencia, aunque si bien mantienen el mismo desfase en valores de X, se puede decir que hasta el momento es la gráfica con más concordancia entre herramientas. Los tres saltos se pudieron distinguir en ambas gráficas, de las cuales se ve un comportamiento similar en aquellas que están por debajo de 140 en X. Y aunque no parezcan sobrepuestas, el salto por encima de valor mencionado, mantienen un parecido en la vuelta formada por esta.

Esta vez al observar la Figura 56, se logra percibir una trayectoria más parecida entre ambos. Pues en las dos herramientas se ven los saltos con bastante claridad. También es observable como en los valores menores de Y, que en Tracker es más visible la flexión que sucede al momento del impacto contra el suelo, y que se ve más suavizado con FreeMoCap. A diferencia de la rodilla izquierda, esta vez se observó en la Figura 58, que los puntos de flexión sólo pudieron ser implementados desde la configuración manual, y aunque FreeMoCap parece querer simular el movimiento, no es tan notorio como lo hace Tracker.

Viendo las figuras 60 y 62, se puede diferenciar el recorrido que hace cada una de las gráficas. También se observó con más claridad cada salto en el trayecto, de esta misma forma se logró apreciar como ambas se comportan con la similitud que se espera. Lo que nuevamente sugiere una mejor toma de datos en las extremidades inferiores. Sin embargo, se observó un desfase y algunos puntos, parte inferior de la gráfica, los cuales no lucen como se esperaría.

Si bien en esta prueba se realizaron acciones leves para poder analizar con más certeza y distinción, los movimientos rápidos parecen ser bastante mejor procesados por FreeMoCap, como se pudo apreciar en la Figura 52 perteneciente a la muñeca derecha. Además el seguimiento de posición del torso fue bastante difícil de plantear de forma correcta.

Durante esta prueba existen más conflictos entre las gráficas, pues a pesar de que en las figuras donde existe el desfase se creería presente un comportamiento similar, pero al comparar una a una, se puede admirar como ambas herramientas en su mayoría son distintas entre sí. Aunque existen ciertos comportamientos que tienden a una forma similar como en la figuras 52, 56, 60 y 62; no ofrece la semejanza que se observó en la prueba de movimiento lineal simple en eje X.

7.7.3. Prueba de movimiento curvilíneo

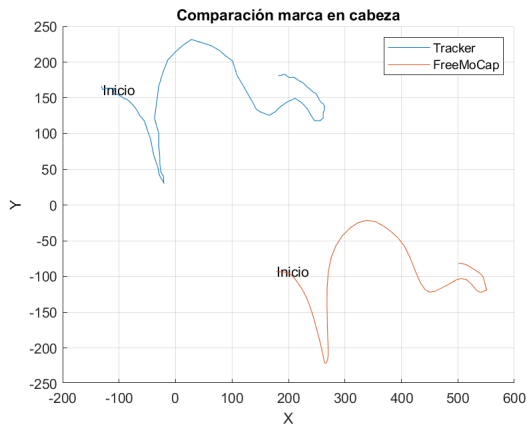


Figura 63: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cabeza de la prueba de movimiento curvilíneo.

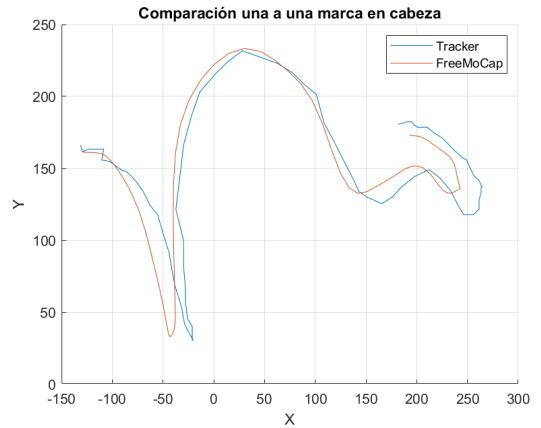


Figura 64: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cabeza de la prueba de movimiento curvilíneo.

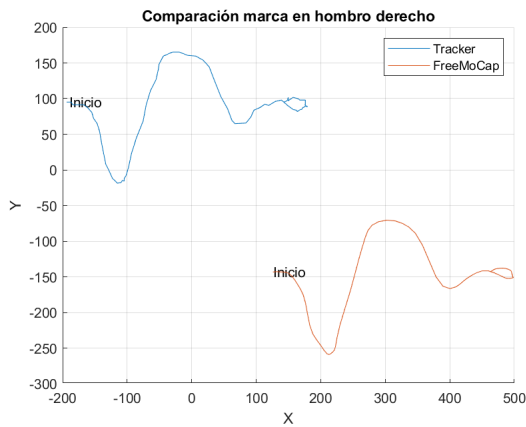


Figura 65: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.

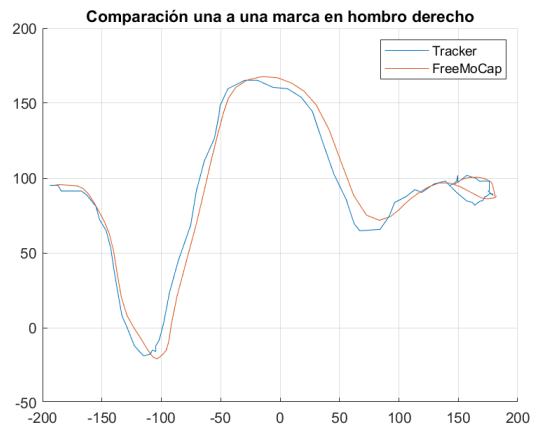


Figura 66: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.

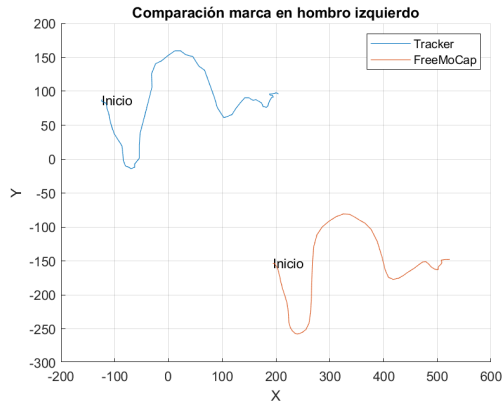


Figura 67: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.



Figura 68: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en hombro izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.

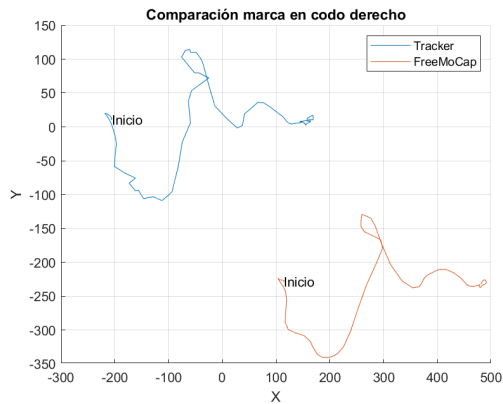


Figura 69: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.

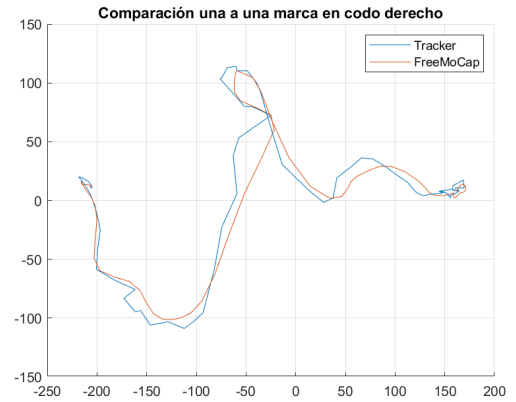


Figura 70: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.



Figura 71: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.

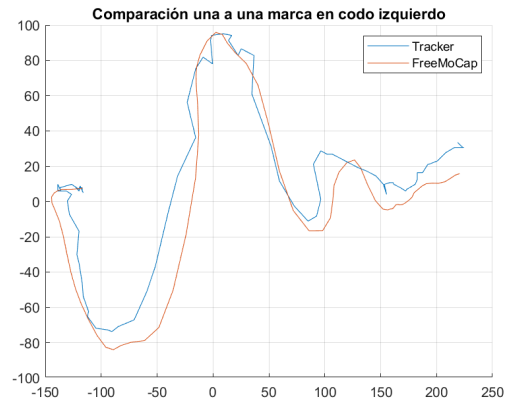


Figura 72: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en codo izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.

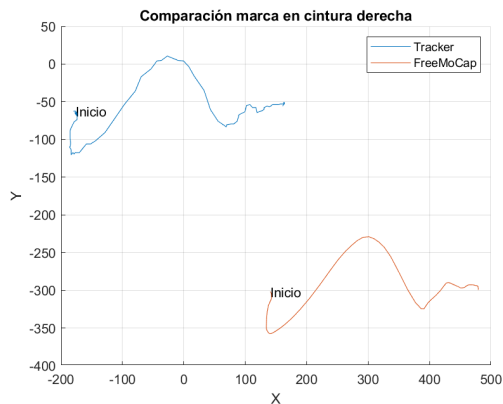


Figura 73: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.

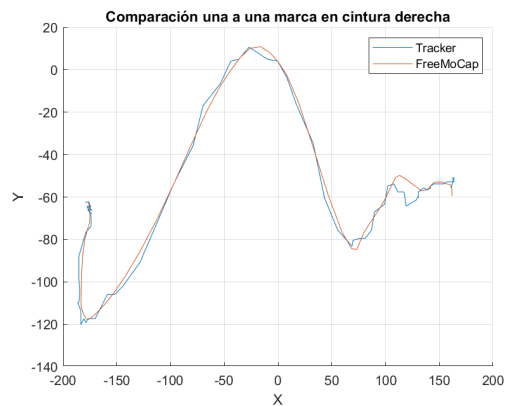


Figura 74: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.

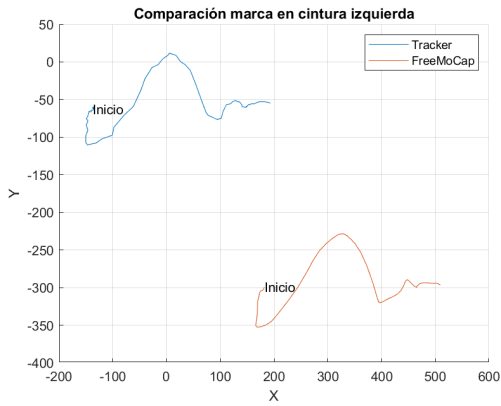


Figura 75: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.

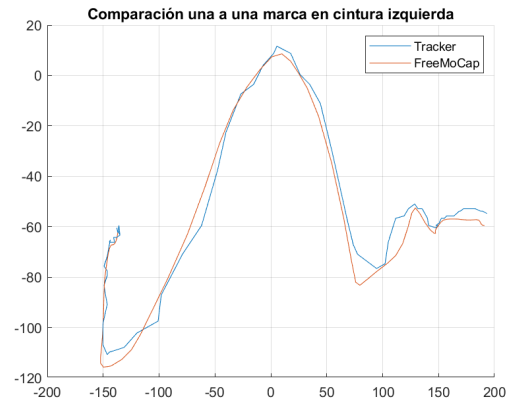


Figura 76: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en cintura izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.



Figura 77: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.

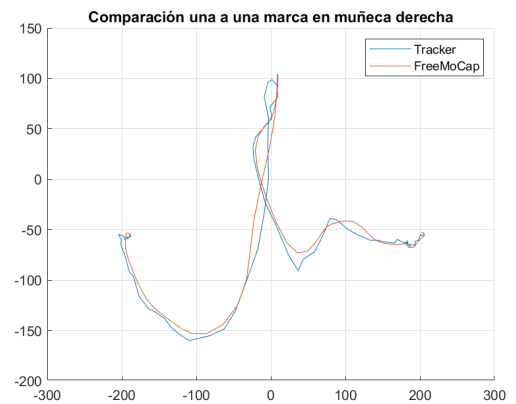


Figura 78: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.



Figura 79: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.

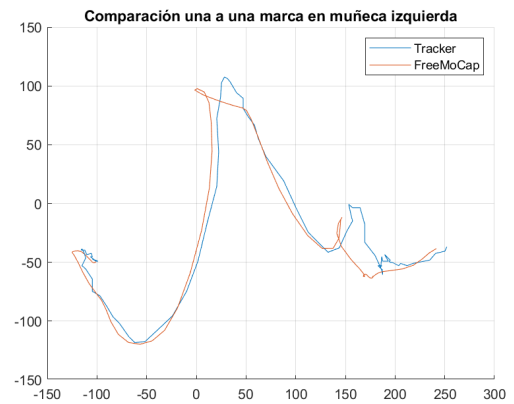


Figura 80: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en muñeca izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.



Figura 81: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.

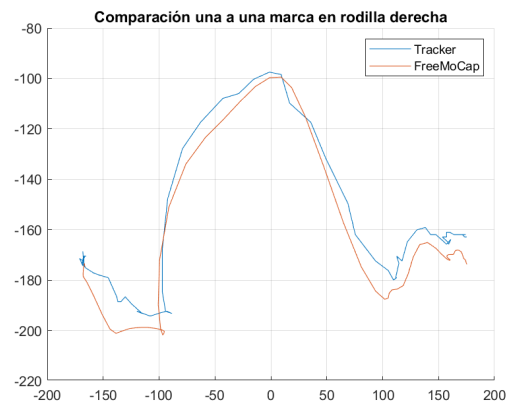


Figura 82: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla derecha de la prueba de movimiento curvilíneo.

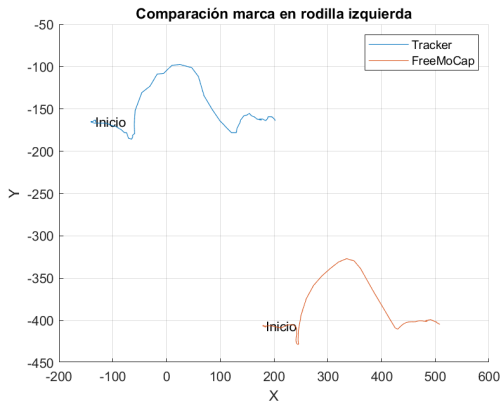


Figura 83: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.

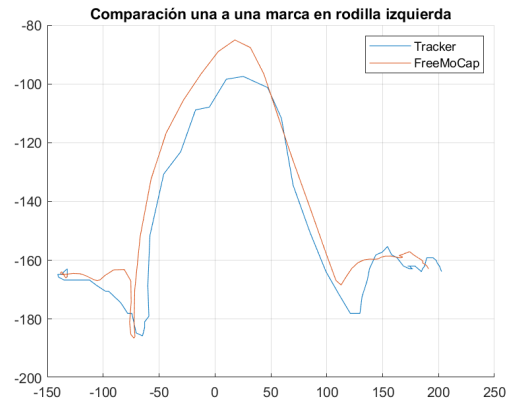


Figura 84: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en rodilla izquierda de la prueba de movimiento curvilíneo.

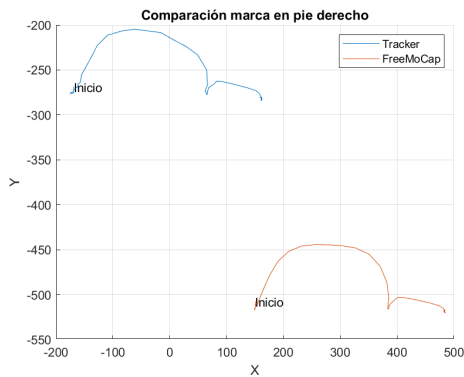


Figura 85: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.

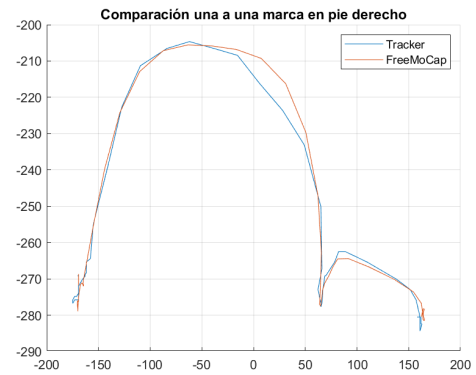


Figura 86: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie derecho de la prueba de movimiento curvilíneo.

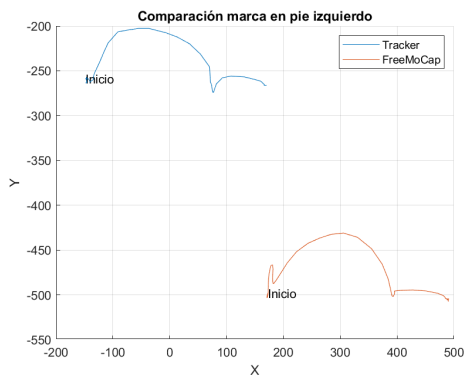


Figura 87: Comparación entre Tracker y FreeMoCap de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.



Figura 88: Comparación entre Tracker y FreeMoCap una a una de la marca en pie izquierdo de la prueba de movimiento curvilíneo.

Para esta última prueba, las gráficas demostraron un comportamiento con muchas más similitudes que en las pruebas anteriores, pues además de que tienen un comportamiento similar, también fue posible apreciar amplitudes semejantes como en las figuras 64, 66, 68, 74, 76, 78 y 86. Aunque en el resto de gráficas la diferencia entre los picos fue más notable, esta no es tan significativa como se han mostrado en las dos primeras pruebas. Como se ha ido observando durante el análisis de este capítulo, FreeMoCap busca suavizar los datos para replicar un movimiento más humano en los cuerpos evaluados, y es posible apreciarla con más calidad en las curvas formadas por el movimiento parabólico de la prueba de movimiento curvilíneo.

Durante la captura de datos para su análisis en el espacio se utilizó el programa OptiTrack para realizar la validación del procesamiento y resultado proveniente de FreeMoCap. Así como en el análisis 2D, las grabaciones fueron hechas dentro del ecosistema Robotat.

8.1. Configuración utilizada para la toma de datos

En la toma de datos y análisis en 3D con la herramienta FreeMoCap, se utilizaron tres cámaras web Logitech C270. En la Figura 89 se muestra cada cámara y el lugar en que se ubicaron, trípodes 1, 2 y 3. La primera y la segunda cámara se ubicaron a una distancia de 4 metros y entre la segunda cámara hacia la tercera hay una distancia de 5 metros. Cada cámara estaba ubicada aproximadamente a 45° de cada eje y a una altura de 1.75 metros, 1 metro desde la base del Robotat. Esta configuración ayuda al programa a una calibración más sencilla y, por lo tanto, una toma de datos más fácil.

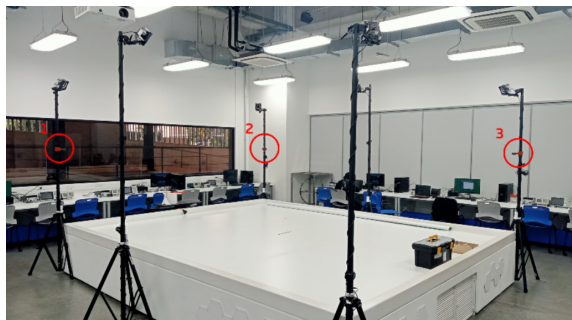


Figura 89: Cámaras ubicadas dentro del Robotat.

8.2. Calibración

Al realizar la calibración de las cámaras en FreeMoCap se realizaron varias iteraciones para encontrar el tamaño adecuado del tablero ChArUco. En las primeras iteraciones se utilizó un tablero de aproximadamente 40 a 80 milímetros de tamaño por recuadro. Ya que era necesario que dos cámaras al mismo tiempo observen el tablero para una correcta calibración, estos tamaños resultaron en un error. Por lo que se realizó una nueva prueba con un tamaño de 130 milímetros por recuadro, el cual se imprimió en hojas de papel tamaño carta a manera de póster y se construyeron en un cartón para que tuviera una consistencia firme.

8.3. Esqueleto

Debido que la herramienta OptiTrack utiliza diversas configuraciones para la toma de datos en cuerpos, se buscó la más parecida a la utilizada por FreeMoCap.

FreeMoCap utiliza el modelo MediaPipe Holistic [19] para la captura de esqueletos, el cual se caracteriza por hacer seguimiento de pose, colocar marcadores de cara y manos. El rastreo en tiempo real de estos puntos representa un problema difícil y requiere de interferencia de varias redes neuronales simultaneas y dependientes.

MediaPipe Holistic hace uso de los modelos de pose, cara y mano MediaPipe Pose [20], MediaPipe FaceMesh [21] y MediaPipe Hands [22], que generan una cantidad de 543 puntos en conjunto (33 puntos en pose, 468 en cara y 21 en manos). Ya que para fines de la investigación sólo se buscó generar la comparación en pose, se omitieron los datos generados en la toma de cara y manos. Los 33 puntos en la pose son descritos en la Figura 90.

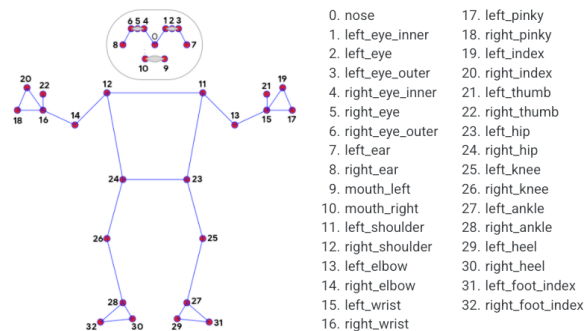


Figura 90: Marcadores ubicados en MediaPipe Pose [19].

Al tener varios tipos de configuraciones en OptiTrack, se utilizó la más parecida a la proveniente de FreeMocap. La seleccionada fue la configuración Baseline [23], la cual cuenta con una cantidad de 41 marcadores distribuidos en todo el cuerpo como se puede ver en las figuras 91 y 92, resultado que se puede observar en las figuras 93 y 94. Aunque esta configuración no es totalmente similar al modelo usado por FreeMoCap, es la que más semejanza tiene, debido a esto sólo se tomaron en cuenta los puntos y marcadores comunes para realizar la comparación.

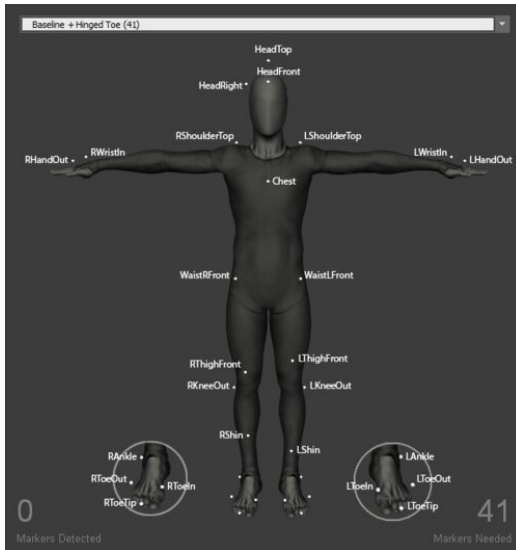


Figura 91: Configuración *Baseline* en vista frontal [23].

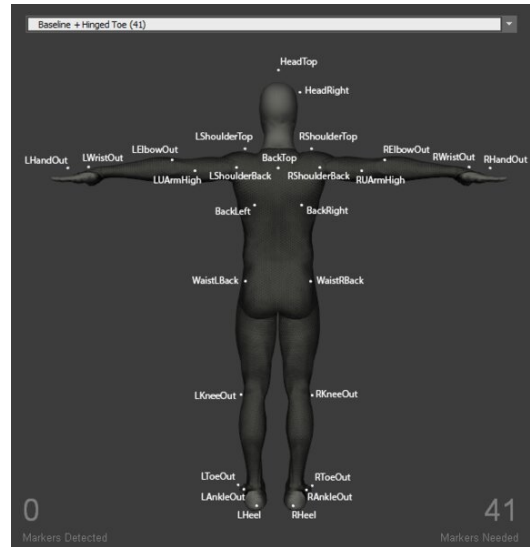


Figura 92: Configuración *Baseline* en vista trasera [23].



Figura 93: Configuración *Baseline* aplicada al traje en vista frontal.



Figura 94: Configuración *Baseline* aplicada al traje en vista trasera.

8.4. Comparación

Para establecer que se estuvieran comparando exactamente los mismos movimientos, se realizó la captura de datos al mismo tiempo con ambas herramientas. En donde se realizó

un movimiento correspondiente al inicio de la grabación. Los movimientos analizados correspondieron a una caminata en círculo, para después terminar nuevamente con una señal para la detención de ambas tomas.

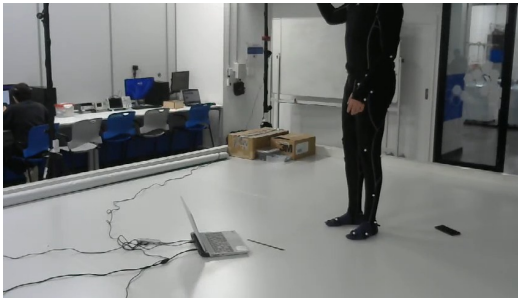


Figura 95: Toma inicial en la vista desde la cámara 1 de FreeMoCap.

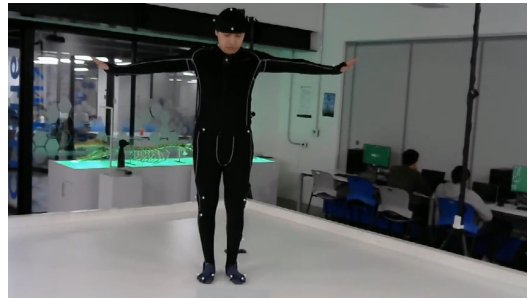


Figura 96: Toma final en la vista desde la cámara 1 de FreeMoCap.



Figura 97: Toma inicial en la vista desde la cámara 2 de FreeMoCap.

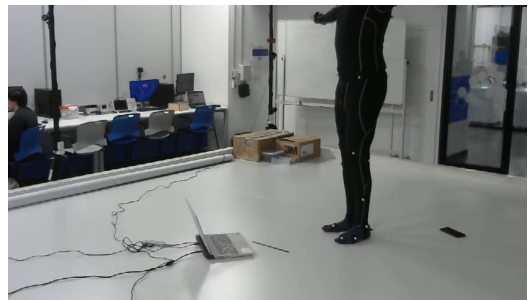


Figura 98: Toma final en la vista desde la cámara 2 de FreeMoCap.

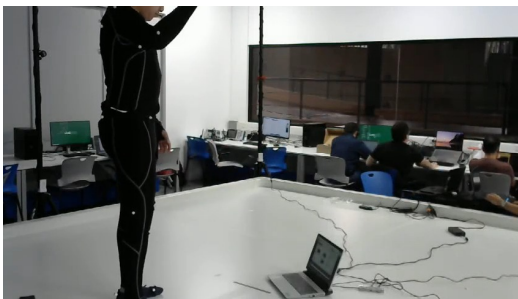


Figura 99: Toma inicial en la vista desde la cámara 3 de FreeMoCap.



Figura 100: Toma final en la vista desde la cámara 3 de FreeMoCap.

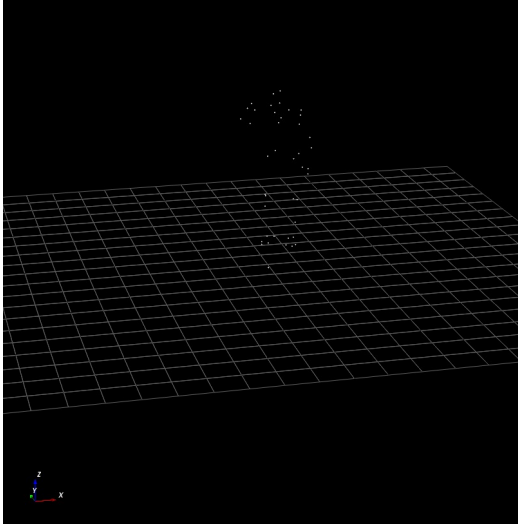


Figura 101: Toma inicial vista en OptiTrack desde el programa Mokka [24].

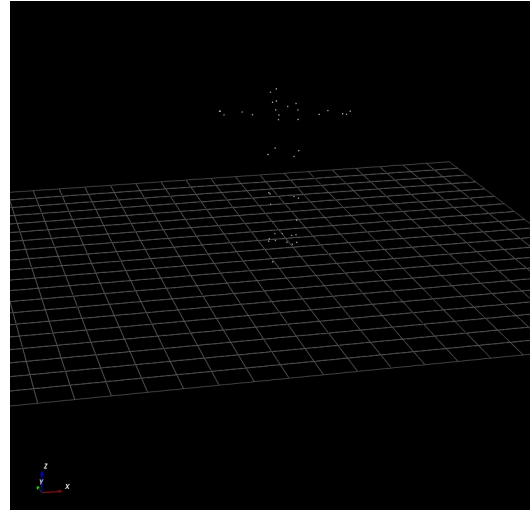


Figura 102: Toma final vista en OptiTrack desde el programa Mokka [24].

Todas las figuras anteriores muestran el cuadro de comienzo y final respectivo. En el cual se puede ver que en las cámaras utilizadas para el análisis en FreeMoCap no fue posible capturar en algunos segmentos el cuerpo completo del sujeto, lo que puede repercutir a gran medida, aunque se espera que la predicción de movimiento por medio del aprendizaje automático de FreeMoCap contrarreste este posible problema. Además se utilizó el programa Mokka que ayudó a poder leer los datos recibidos por OptiTrack.

Ambas herramientas de captura devuelven diferentes tamaños de vectores 496 y 2011, para FreeMoCap y OptiTrack respectivamente. Debido a esto se realizó una interpolación al primer grupo de vectores para que ambos llegasen a ser del mismo tamaño y poder compararlas visualmente de mejor manera. Además, OptiTrack trabaja con valores entre 0 y 1, por lo que se multiplica el vector por 1000 y así trabajar con valores más parecidos.

8.4.1. Cabeza

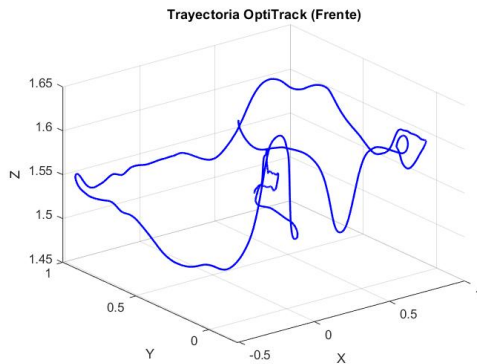


Figura 103: Marca en la frente procesada por OptiTrack.

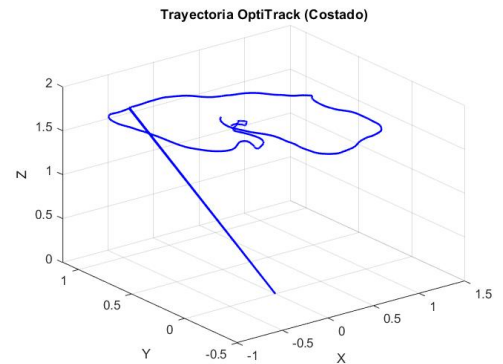


Figura 104: Marca en el costado de la cabeza procesada por OptiTrack.

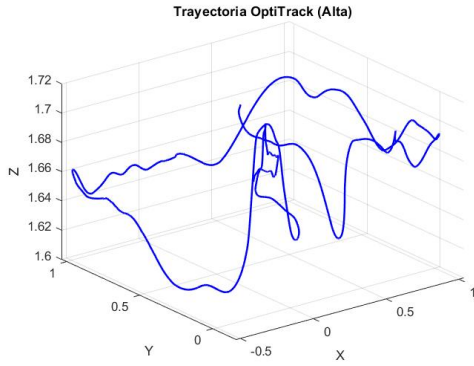


Figura 105: Marca en la cabeza alta procesada por OptiTrack.

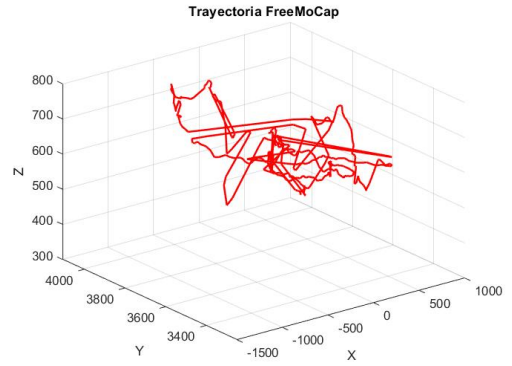


Figura 106: Marca en la cabeza procesada por FreeMoCap.

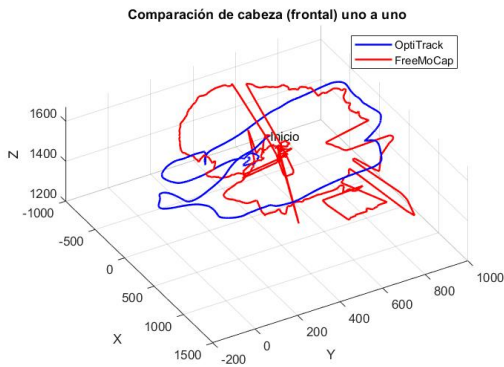


Figura 107: Comparación aproximada de la marca en la frente.

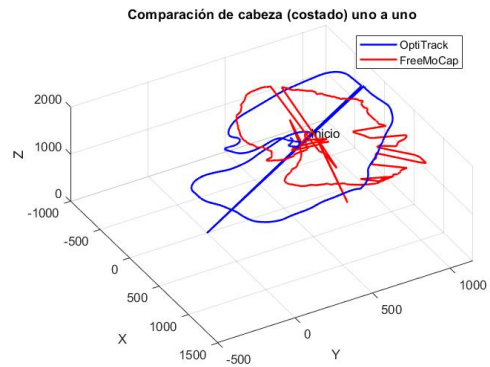


Figura 108: Comparación aproximada de la marca en el costado de la cabeza.

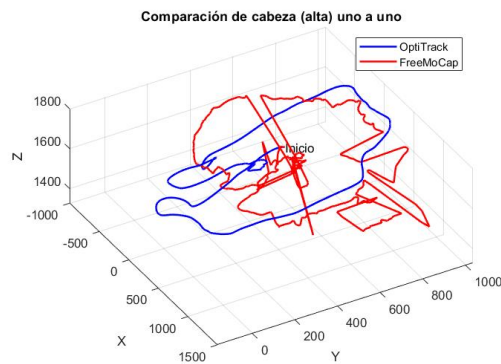


Figura 109: Comparación aproximada de la marca en la cabeza alta.

Con las gráficas obtenidas a partir de las muestras capturadas por OptiTrack de los marcadores en la cabeza, se puede observar como la trayectoria de la frente, Figura 103, y la parte alta, Figura 105, lucen bastante similares, lo que da opción a discutir las de misma forma. Distintamente, el marcador ubicado en el costado de la cabeza, Figura 104 resalta

por un punto atípico, el cual corresponde al momento en que ninguna cámara del OptiTrack logra capturar su ubicación.

Observando la gráfica proveniente de FreeMoCap 106 se logró apreciar un nivel de ruido distinto al presentado durante el capítulo anterior. Después de sobreponer una gráfica tras otra se apreció un distinto uso del espacio, indiferente a la escala utilizada, el cual aparenta ser más ancho en X y más angosto en Y.

Aunque fue posible avistar comportamientos comunes entre ambas herramientas, como el visto en los puntos cercanos a (500, 200, 1400), en donde se ve un pico en las tres gráficas de OptiTrack como en la de FreeMoCap. Con estos comportamientos se pudo suponer una tendencia en la similitud entre la captura de datos, sin embargo, existió una falta del filtro que caracterizó a FreeMoCap en el análisis anterior.

8.4.2. Hombro derecho

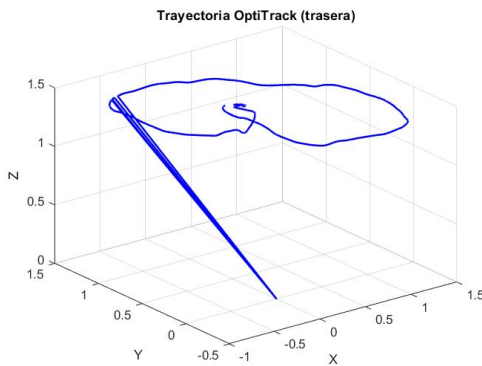


Figura 110: Marca en la parte trasera del hombro derecho procesada con OptiTrack.

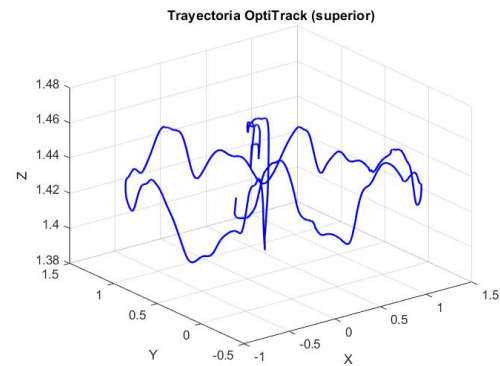


Figura 111: Marca en la parte superior del hombro derecho procesada con OptiTrack.

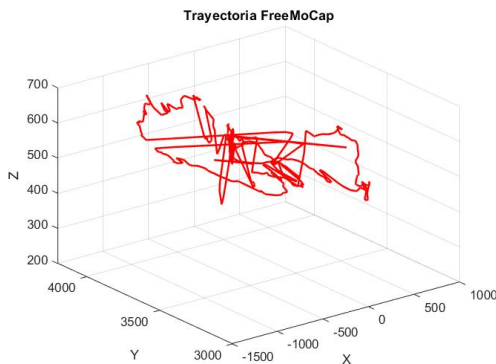


Figura 112: Marca del hombro derecho procesada por FreeMoCap.

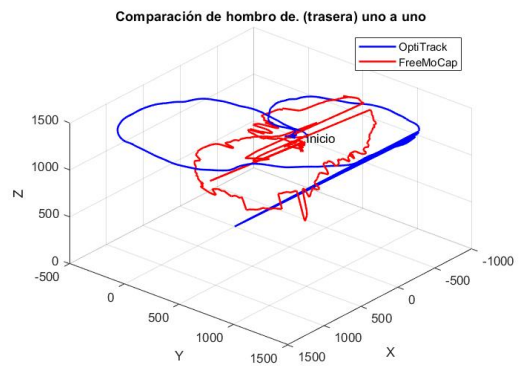


Figura 113: Comparación aproximada de la marca en la parte trasera del hombro derecho.

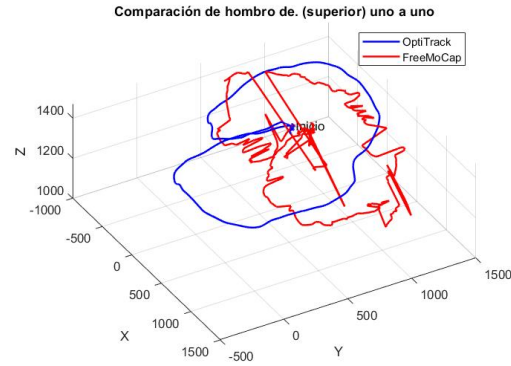


Figura 114: Comparación aproximada de la marca en la parte superior del hombro derecho.

En la Figura 110 se puede observar nuevamente instantes en donde no se logró capturar la ubicación del marcador, mientras que en la Figura 111 se distingue una trayectoria completa, aunque también se ven más cambios de altura.

Tras hacer la comparación entre gráficas, figuras 113 y 114, nuevamente se ve la diferencias entre el tamaño de la trayectoria, y esta vez no se distinguen comportamientos similares. Además, el ruido en la captura de FreeMoCap es de mayor magnitud comparada a la vista en la muestra de la cabeza.

Si bien existe una pequeña grada en la gráfica de FreeMoCap que se asemeja muy poco a las gradas vistas en el hombro derecho, aproximadamente entre $(-500, 0, 1000)$. Esta no es lo suficientemente pronunciada para asegurar que son paralelas en el tiempo.

8.4.3. Hombro izquierdo

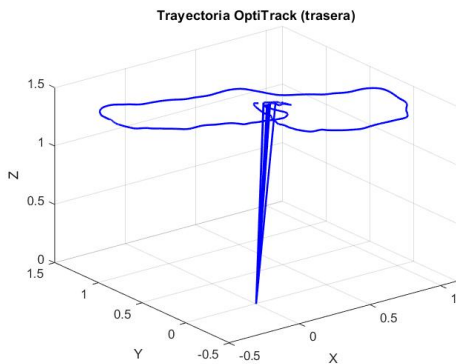


Figura 115: Marca en la parte trasera del hombro izquierdo procesada con OptiTrack.

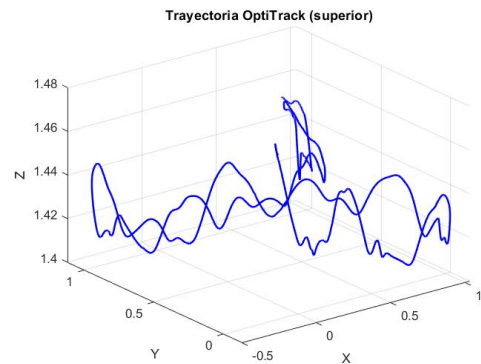


Figura 116: Marca en la parte superior del hombro izquierdo procesada con OptiTrack.

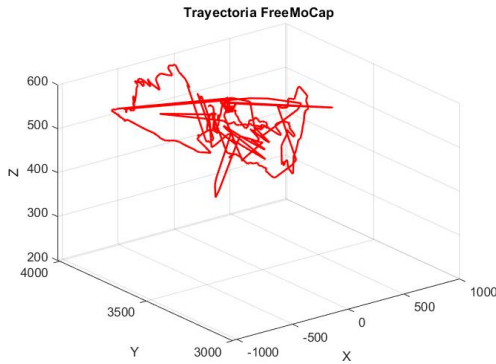


Figura 117: Marca del hombro izquierdo procesada por FreeMoCap.

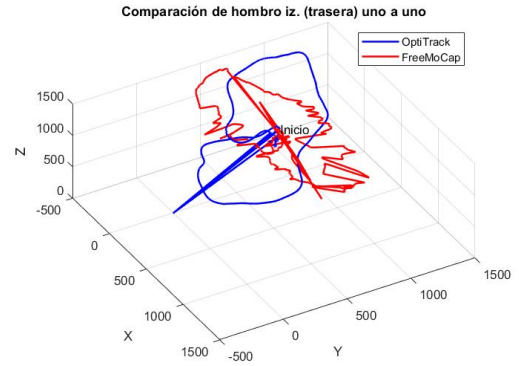


Figura 118: Comparación aproximada de la marca en la parte trasera del hombro izquierdo.

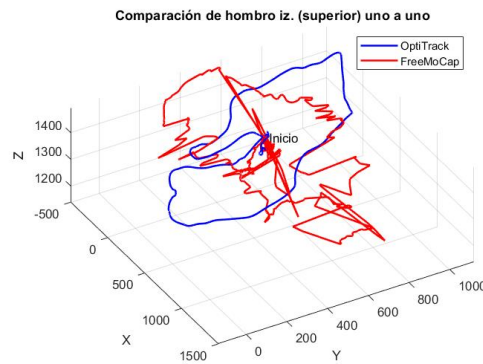


Figura 119: Comparación aproximada de la marca en la parte superior del hombro izquierdo.

Cuando se observa la Figura 115 se hacen notar más puntos que no fueron capturados, por lo que se puede empezar a concluir que en parte de la toma, los marcadores ubicados en la parte trasera del cuerpo no pudieron ser procesados en todo el tiempo. Esto también se ve ya que el marcador ubicado en la parte superior del hombro, Figura 116, es más apreciable en toda la trayectoria.

Esta vez el comportamiento que ha mantenido FreeMoCap en la diferencia del circuito es más notable, a pesar de esto, también se ven picos en ambas gráficas, que como se mencionó con anterioridad, no es seguro que pertenezcan a la misma posición del sujeto.

8.4.4. Brazo superior derecho

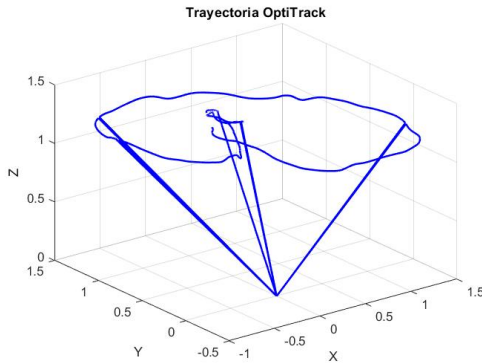


Figura 120: Marca del brazo superior derecho procesada por OptiTrack.

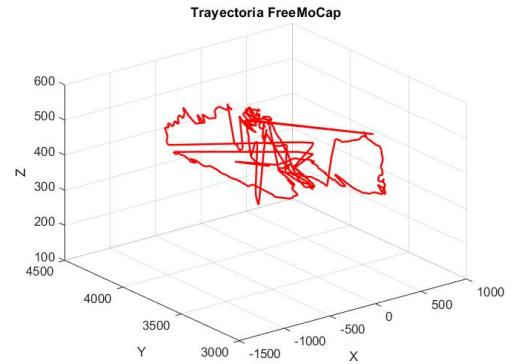


Figura 121: Marca del brazo superior derecho procesada por FreeMoCap.

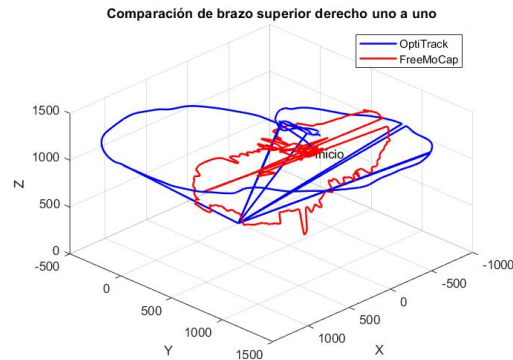


Figura 122: Comparación aproximada de la marca del brazo superior derecho.

Esta vez la trayectoria del brazo derecho, Figura 120, parece tener menos puntos atípicos en los que no fue visible el marcador. Mientras que la captura de FreeMoCap, Figura 121, se presenta más ruido de lo común. Esto es más claro cuando se observan ambas gráficas sobrepuestas, Figura 122.

Cuando se comparan puede notarse un comportamiento de gran magnitud en OptiTrack, que no pudo ser capturado por FreeMoCap, y que tampoco pareció indicar un segmento igual a este. Si bien ambas mostraron un tamaño semejante en el plano XZ, en el plano XY es donde aparecen las mayores discrepancias en cuanto a recorrido.

8.4.5. Brazo superior izquierdo

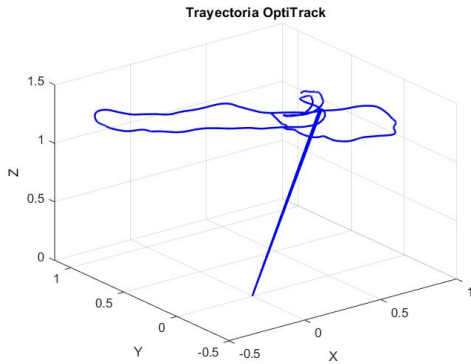


Figura 123: Marca del brazo superior izquierdo procesada por OptiTrack.

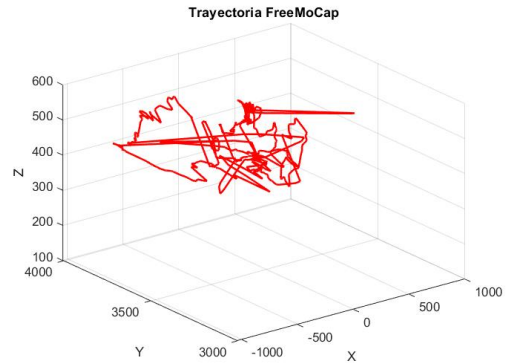


Figura 124: Marca del brazo superior izquierdo procesada por FreeMoCap.

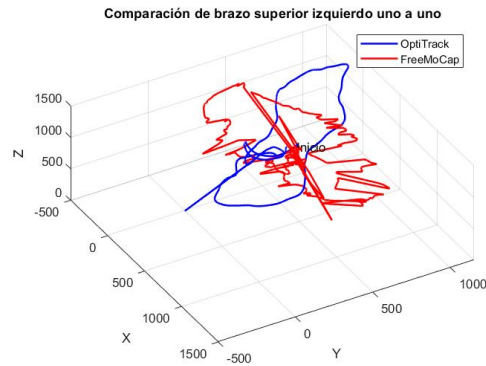


Figura 125: Comparación aproximada de la marca del brazo superior izquierdo.

Aunque en la anterior muestra se pudo notar una trayectoria más circular, esta vez se ve un recorrido más angosto, Figura 123. Por otro lado, en la Figura 124 se siguió observando un ruido que ya se ha vuelto característico.

De manera contraria a la vista en el brazo derecho, al sobreponer las gráficas de ambas herramientas, Figura 125, se pudo observar una curva bastante parecida de ambas partes (-500, 500, 1000) Y (-500, 1000, 1000) aproximadamente para FreeMoCap y OptiTrack respectivamente. Ambas trayectorias parecen estar desfasadas de forma angular entre sí, lo que puede dar una idea de lo que sucede en los demás marcadores.

8.4.6. Codo derecho

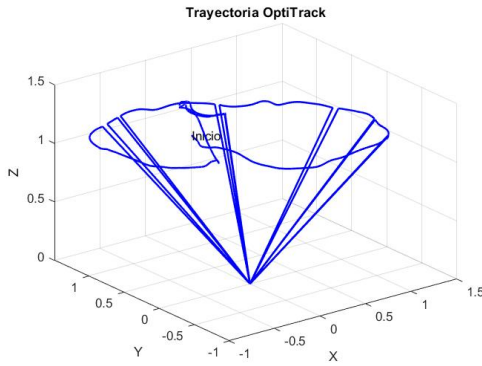


Figura 126: Marca del codo derecho procesada por OptiTrack.

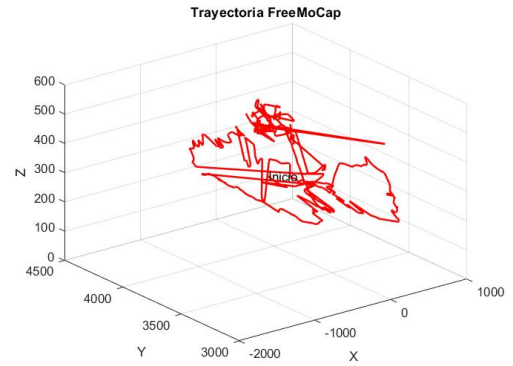


Figura 127: Marca del codo derecho procesada por FreeMoCap.

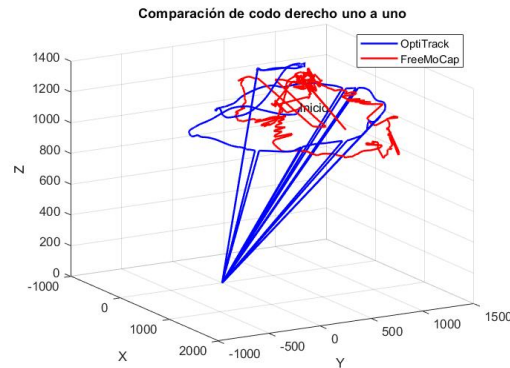


Figura 128: Comparación aproximada de la marca del codo derecho.

Dada la Figura 126 se puede observar una gran cantidad de instantes en donde se pierde el marcador, habiendo más espacios en blanco en toda la trayectoria. Consecuentemente, la gráfica de FreeMoCap, Figura 127, mantuvo una alteración muy notoria, y un pico en Z que se eleva aproximadamente a 500, la cual no permitió distinguir bien el comportamiento del movimiento capturado.

A partir de lo mencionado anteriormente, al sobreponer las gráficas, se pudo ver en ambas el mismo pico en Z , esta vez escalado. Aunque debido a los espacios vacíos y al ruido de la captura, no fue posible compararlas visualmente de mejor manera.

8.4.7. Codo izquierdo

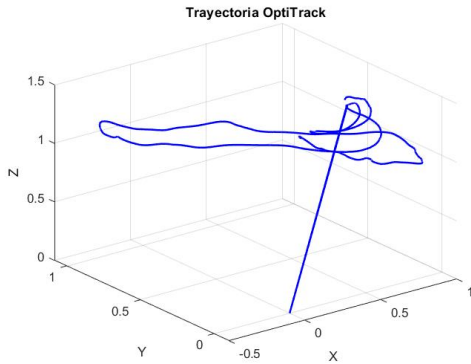


Figura 129: Marca del codo izquierdo procesada por OptiTrack.

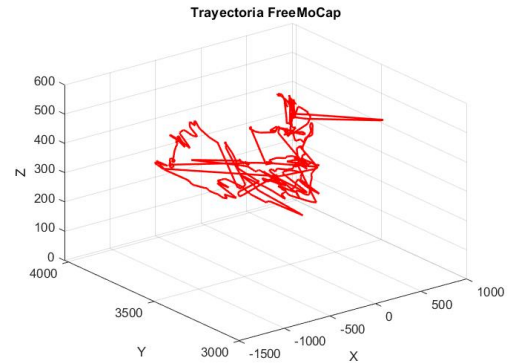


Figura 130: Marca del codo izquierdo procesada por FreeMoCap.

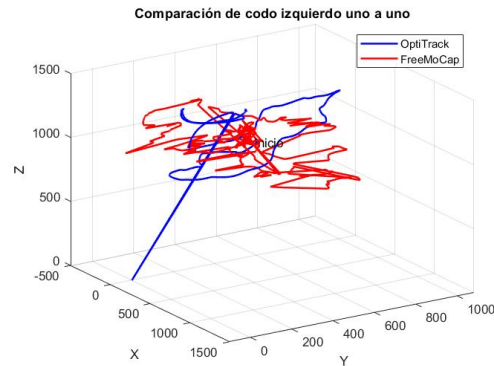


Figura 131: Comparación aproximada de la marca del codo izquierdo.

Al igual que lo visto en los marcadores ubicados en los hombros, el lado izquierdo demostró tener un comportamiento más angosto, Figura 129, a la de su contraparte. Mientras que en la vista mostrada, Figura 130, siguió siendo complicado de diferenciar en cuanto a la trayectoria capturada por FreeMoCap. Nuevamente al hacer los ajustes de escala necesarios, se observó un desfase angular entre ambas, Figura 131.

Esto queda claro al comparar los picos en los extremos negativos del eje X. Y aunque fue posible ver una pequeña cola en la esquina contraria, que se asemeja entre ambas herramientas, las turbulentas capturas de FreeMoCap no permitieron observar de mejor manera el comportamiento para poder compararlas y detallar si son ocasionadas por los mismos movimientos.

8.4.8. Muñeca derecha

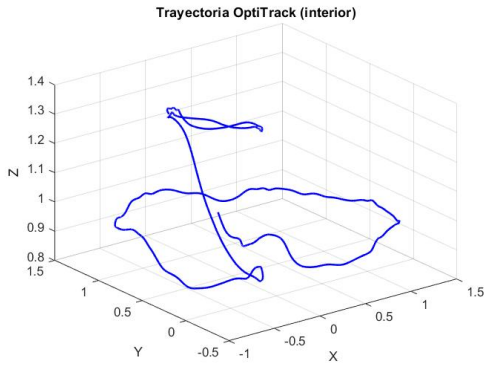


Figura 132: Marca de la parte interior de la muñeca derecha procesada por OptiTrack.

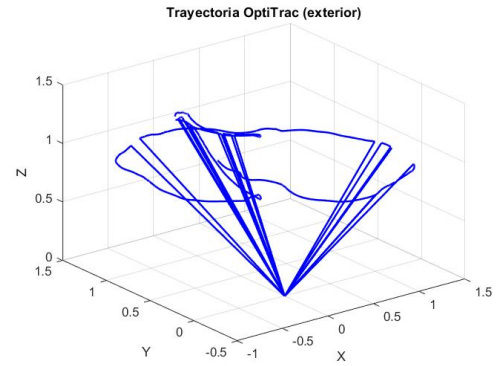


Figura 133: Marca de la parte exterior de la muñeca derecha procesada por OptiTrack.

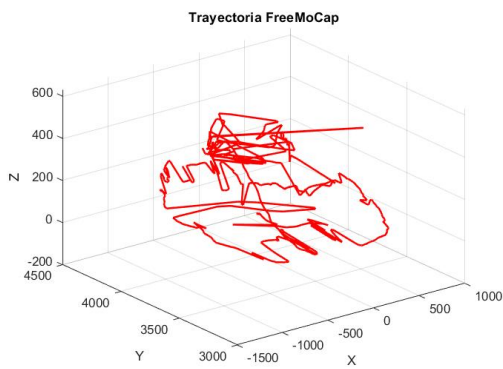


Figura 134: Marca de la muñeca derecha procesada por FreeMoCap.

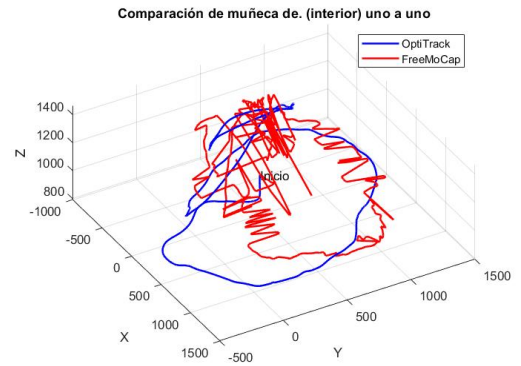


Figura 135: Comparación aproximada de la marca de la parte interior de la muñeca derecha.

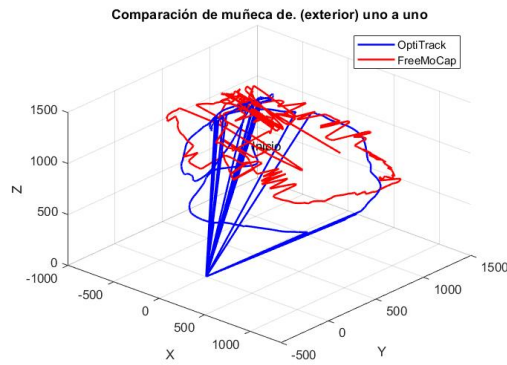


Figura 136: Comparación aproximada de la marca de la parte exterior de la muñeca derecha.

Observando tanto la parte externa de la muñeca, Figura 133, y al compararla con la parte interna, Figura 132, se pudo observar como ambas lucían bastante parecidas, omitiendo los espacios en blanco que fueron a causa de la no captura. Esto ayudó a poder analizar ambas de una misma forma, y así poder omitir la Figura 136 que tiene una vista más lejana por los puntos atípicos formados.

Gracias a la comparación sobrepuesta, Figura 135, se pudo ver un comportamiento más parecido a los que se ha visto durante el momento, pues omitiendo las oscilaciones nacientes en algunas curvas, se vio un trayectoria muy similar en cuanto al ancho del eje X y en la forma de las curvas. Esta captura acercó más a la comparación que se planeaba encontrar, pues admite la posibilidad de una toma más precisa.

8.4.9. Muñeca izquierda

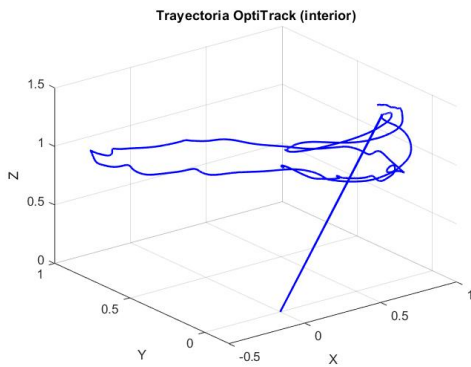


Figura 137: Marca de la parte interior de la muñeca izquierda procesada por OptiTrack.

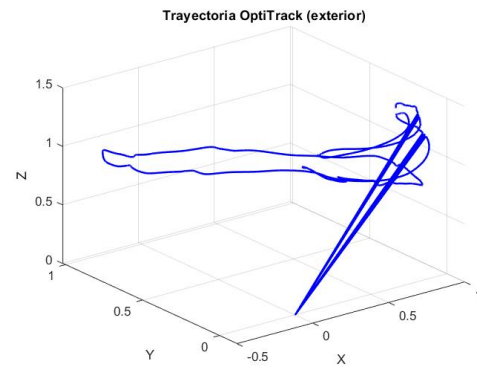


Figura 138: Marca de la parte exterior de la muñeca izquierda procesada por OptiTrack.

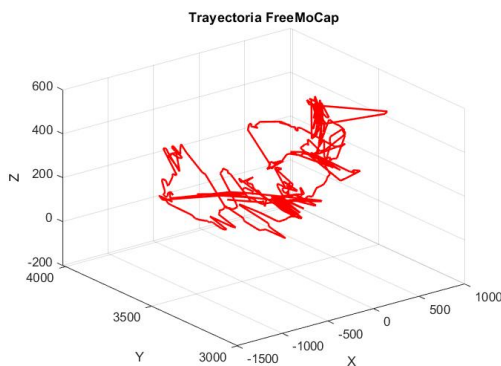


Figura 139: Marca de la muñeca izquierda procesada por FreeMoCap.

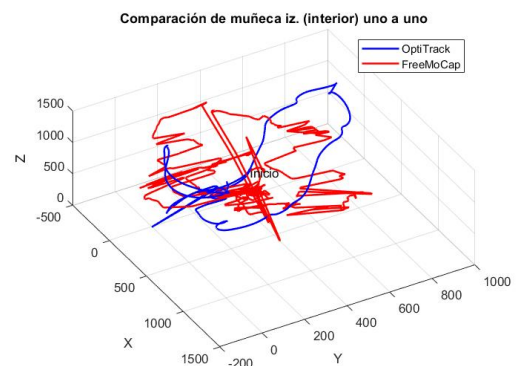


Figura 140: Comparación aproximada de la marca de la parte interior de la muñeca izquierda.

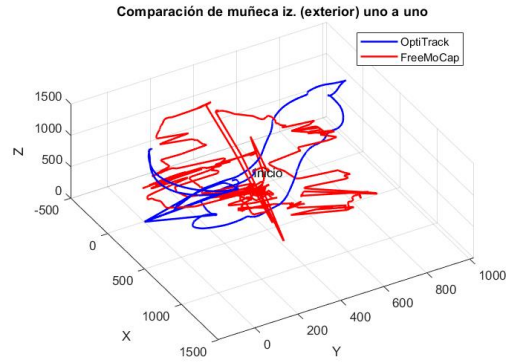


Figura 141: Comparación aproximada de la marca de la parte exterior de la muñeca izquierda.

Una vez más se pudo ver como las gráficas pertenecientes a la parte interna y externa, figuras 137 y 138 respectivamente, son similares en todo el recorrido, lo que permite un análisis en conjunto.

Inesperadamente a lo hallado en el inciso anterior, esta vez la trayectoria proveniente de FreeMoCap 139 es menos parecida a la toma de OptiTrack. Pues en ningún momento se ven picos ni curvas similares, tanto a un mayor ruido de parte de FreeMoCap como a diferentes tamaños del circuito recorrido.

8.4.10. Mano derecha

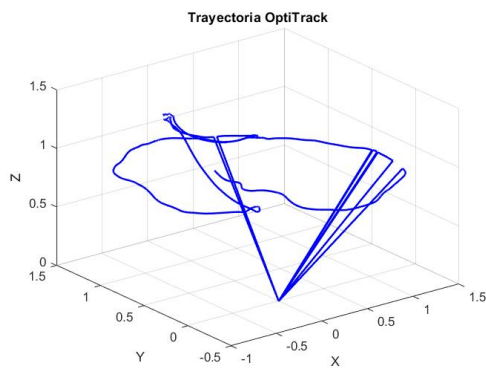


Figura 142: Marca de la mano derecha procesada por OptiTrack.

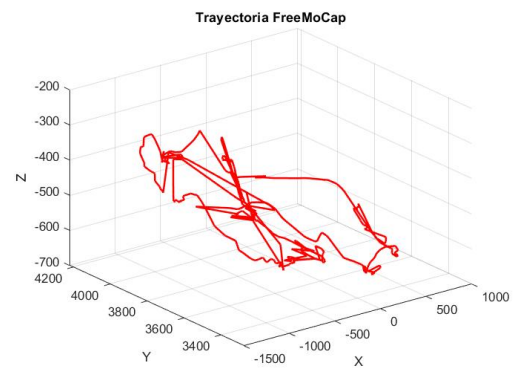


Figura 143: Marca de la mano derecha procesada por FreeMoCap.

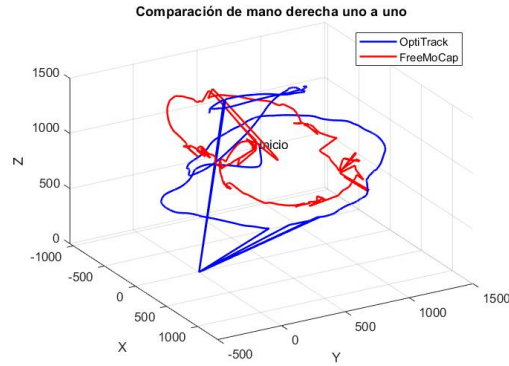


Figura 144: Comparación aproximada de la marca de la mano derecha.

Al igual que su conjunto, la mano ubica en la parte derecha parece ser bastante similar en cuanto a comportamiento. Que aunque no sea tan notorio en FreeMoCap 143, se puede observar de mejor manera en la figura 142. Esto es algo que resulta lógico pues el marcador correspondiente se encuentra ubicado muy cerca a los de la muñeca.

Gracias a esta tendencia, podemos observar en la comparación una a una 144 que las dos trayectorias vuelven a ser similares en cuanto a recorrido, si bien ya no se presentan las oscilaciones vistas con anterioridad en FreeMoCap, la variación en el ancho del recorrido es algo que se tiene que tomar en cuenta.

8.4.11. Mano izquierda

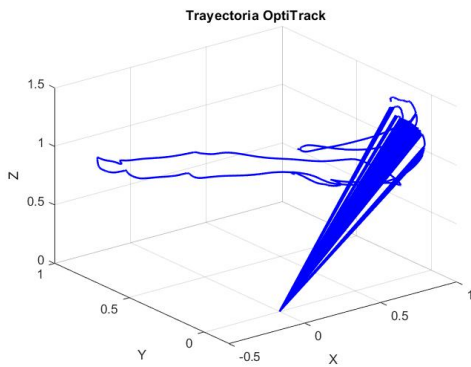


Figura 145: Marca de la mano izquierda procesada por OptiTrack.

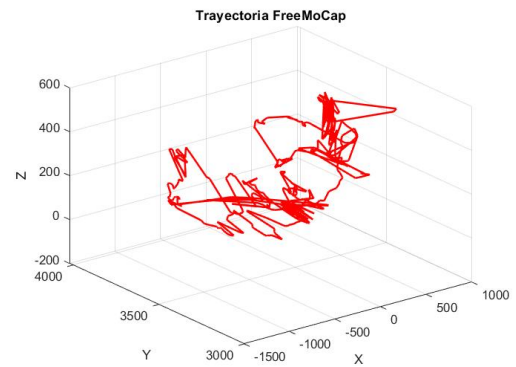


Figura 146: Marca de la mano izquierda procesada por FreeMoCap.

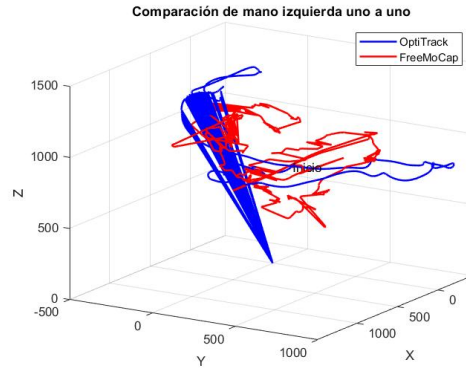


Figura 147: Comparación aproximada de la marca de la mano izquierda.

Repetidamente en el lado izquierdo de las extremidades superiores 145, vemos un gran espacio vacío, puntos que tienden a cero. Cosa que hace más difícil la comparación visual entre ambas gráficas. Pues aunque en ambas se vean un salto en z, la figura de FreeMoCap 146 nuevamente presenta bastante ruido.

En la comparación escalada 147 ya logramos ver un comportamiento similar entre ambas, aunque este solo se presente en el salto anteriormente mencionado. A pesar de esto, esta muestra rompe el esquema esperado después del análisis de trayectoria de la marca en la muñeca izquierda.

8.4.12. Cintura derecha

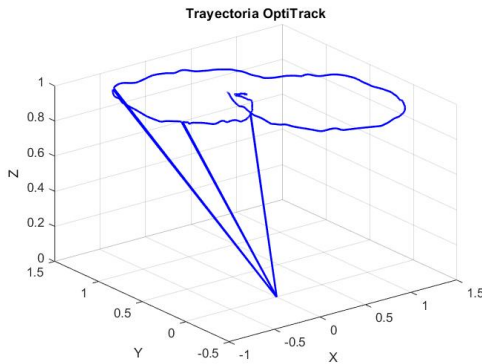


Figura 148: Marca de la cintura derecha procesada por OptiTrack.

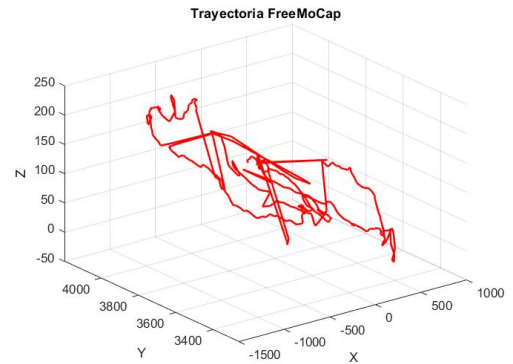


Figura 149: Marca de la cintura derecha procesada por FreeMoCap.

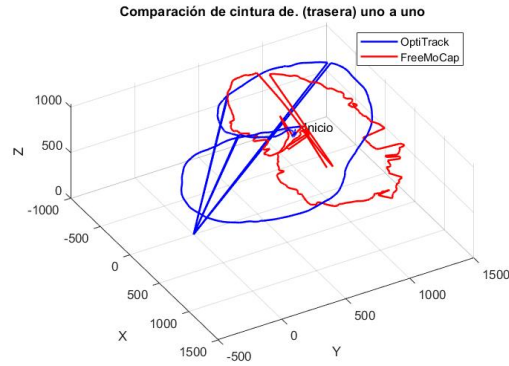


Figura 150: Comparación aproximada de la marca de la cintura derecha.

Observando la Figura 148 se aprecia un recorrido elíptico bastante marcado, el cual resulta ser el esperado. Mientras que por otro lado, el ruido que mantiene FreeMoCap no permite distinguir de manera correcta la trayectoria en la figura correspondiente 149.

Hasta comparar las dos trayectorias una a una, Figura 150 es posible percibir una recorrido muy similar. Como se observó anteriormente, es posible que exista un desfase en el ángulo de la toma de datos, la cual también es notada en esta muestra, ya que pareciesen tener más en común si esta se viese sin dicho desfase.

8.4.13. Cintura izquierda

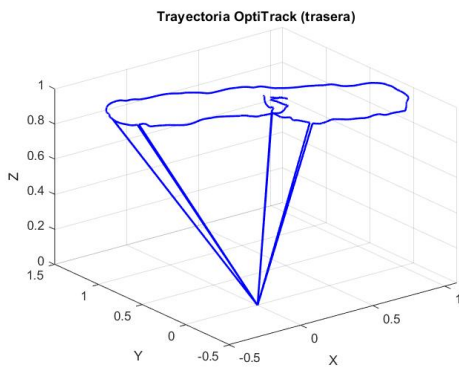


Figura 151: Marca de la parte trasera de la cintura izquierda procesada por OptiTrack.

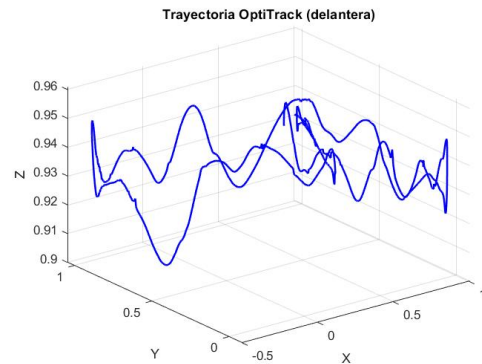


Figura 152: Marca de la parte delantera de la cintura izquierda procesada por OptiTrack.

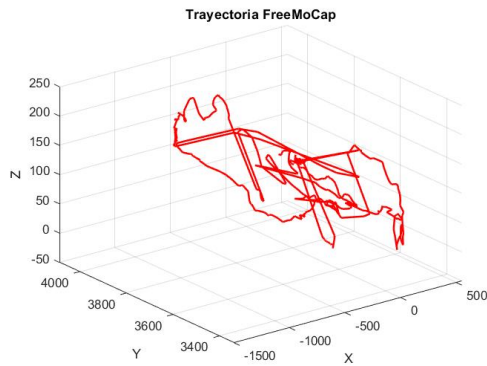


Figura 153: Marca de la cintura derecha procesada por FreeMoCap.

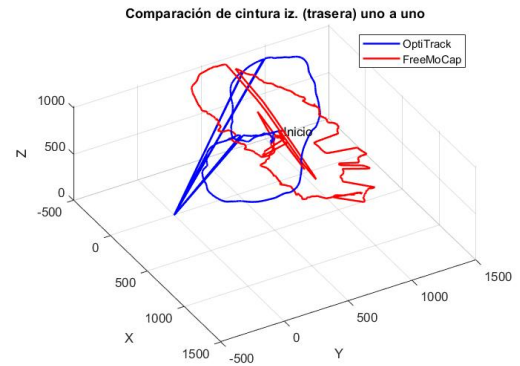


Figura 154: Comparación aproximada de la marca de la parte trasera de la cintura izquierda.

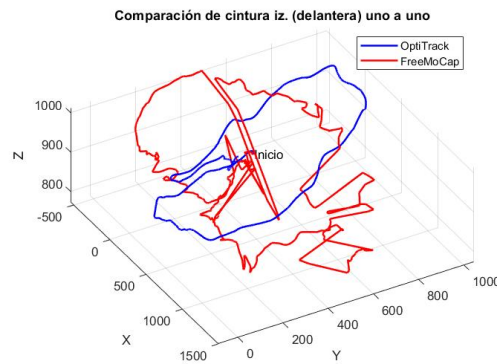


Figura 155: Comparación aproximada de la marca de la parte delantera de la cintura izquierda.

Igual a su contraparte, en la figura correspondientes a la parte trasera de la cintura izquierda 151 se ve una trayectoria bastante marcada, que también es apreciable en la parte delantera de esta 152, sin embargo, esta presenta oscilaciones no vistas en el marcador ubicado en la parte de atrás. Además, esta vez FreeMoCap parece tener una trayectoria más definida desde su propia escala 153.

Cuando se comparan estas gráficas, obtenemos nuevamente bastantes similitudes en cuanto a la tendencia del movimiento. A pesar de que en la Figura 155 vemos que FreeMoCap tiene un mayor tamaño, a diferencia de la Figura 154 que lucen de una misma escala, es posible reconocer una gran similitud, que otra vez es afectada por el desfase angular.

8.4.14. Muslo derecho

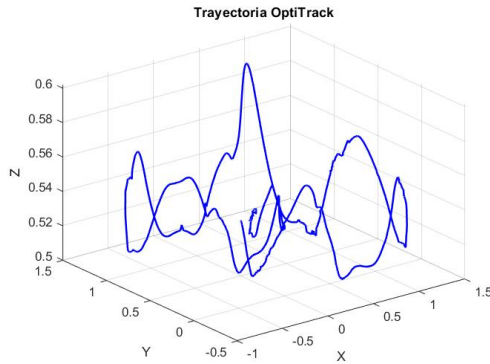


Figura 156: Marca del muslo derecho procesada por OptiTrack.

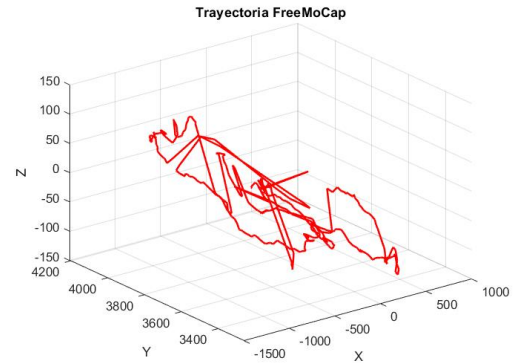


Figura 157: Marca del muslo derecho procesada por FreeMoCap.

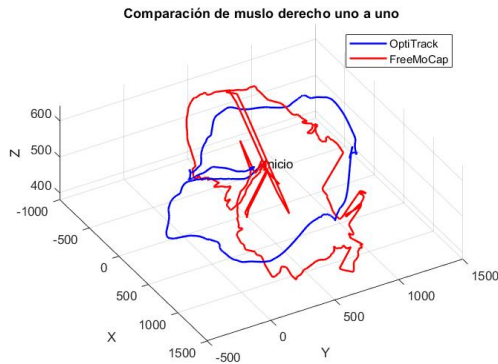


Figura 158: Comparación aproximada de la marca del muslo derecho.

En esta ocasión es fácilmente reconocible una gran oscilación tanto en la gráfica de OptiTrack 156 como en la proveniente de FreeMoCap 157 que a simple vista no lucen tan familiares. Esto cambia en el momento de sobre ponerlas.

En la Figura 158 vemos la que hasta ahora son las gráficas con mayores parecidos, pues aunque aún se note un pequeño desfase, es la que más coincidencias relacionada con curvas y picos son observables. Además, se puede ver un ingreso al interior de los ejes de la trayectoria coincidentes, al inicio del recorrido, el cual hasta ahora si bien ha sido deducible, no se ha observado con claridad debido al ruido ocasionado.

8.4.15. Muslo izquierdo

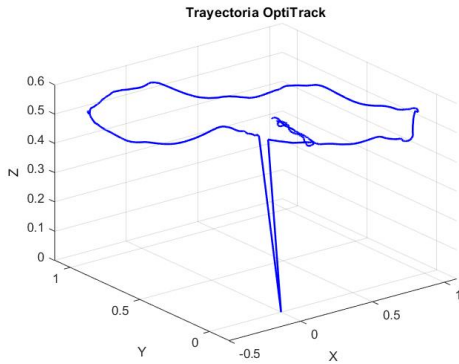


Figura 159: Marca del muslo izquierdo procesada por OptiTrack.

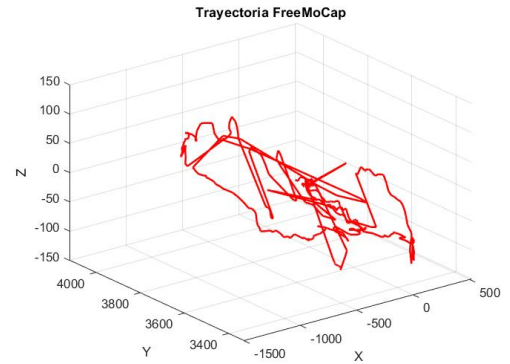


Figura 160: Marca del muslo izquierdo procesada por FreeMoCap.

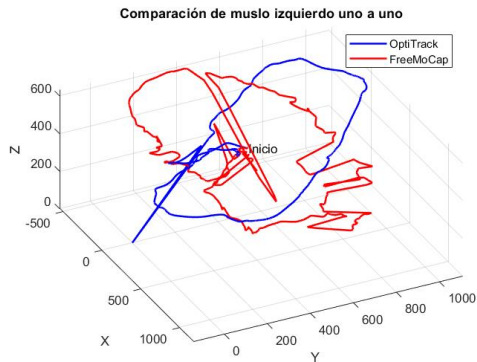


Figura 161: Comparación aproximada de la marca del muslo izquierdo.

Marcando la misma tenencia que su parte contraria. El muslo izquierdo también demuestra una trayectoria circular más visible 159. A comparación, en la gráfica de FreeMoCap 160 también se ve ya un recorrido más distinguible a pesar del ruido, además, en este se vean puntos que van hacia el centro, los cuales también comparte con OptiTrack.

Justamente como lo visto en el muslo derecho, en la Figura 161 vemos coincidencias nuevamente. En el cual se marca el desfase, pero que tiende a parecerse en cuanto a movimientos si se omiten las partes rectas y con puntos que parecen desaparecer en la gráfica de FreeMoCap.

8.4.16. Rodilla derecha

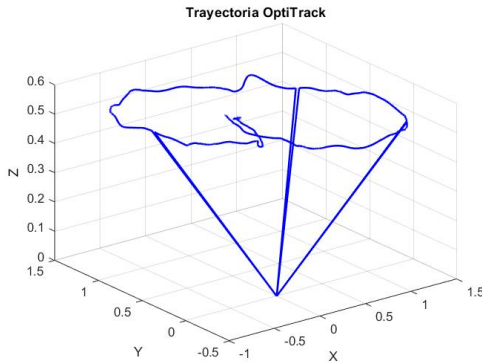


Figura 162: Marca de la rodilla derecha procesada por OptiTrack.

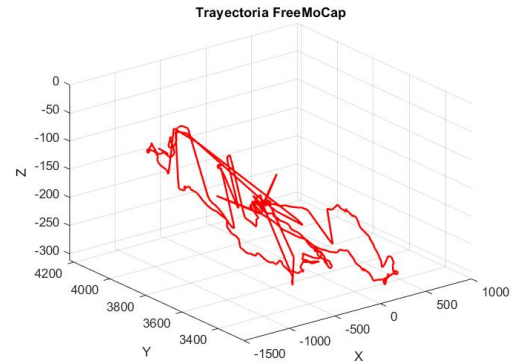


Figura 163: Marca de la rodilla derecha procesada por FreeMoCap.

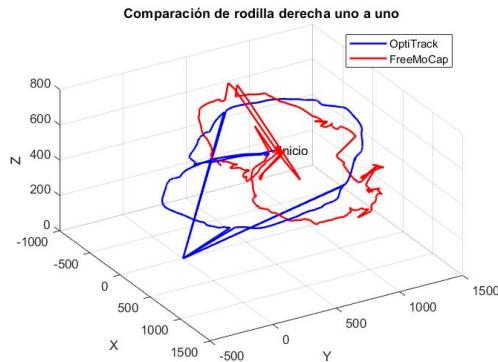


Figura 164: Comparación aproximada de la marca de la rodilla derecha.

Siguiendo el rumbo visto en las extremidades superiores, la complementación del muslo, la rodilla, mantiene un comportamiento bastante parecido, observable en la Figura 164. El cual otra vez tiene un comportamiento parecido, que si bien se ven menos marcadas las curvas que pretenden ser las mismas, aún muestran un recorrido común.

En los muslos y en la rodilla, se ven ubicados un mismo sector, que se encuentra entre los valores (500, 1000, 400) aproximadamente, un pequeño cuadro. El cual se ve marcado en la mayoría de figuras presentadas. Lo que puede indicarnos, de la misma forma que OptiTrack lo hace, puntos en donde las cámaras no distinguen al sujeto o bien el aprendizaje automático no predice correctamente el movimiento realizado.

8.4.17. Rodilla izquierda

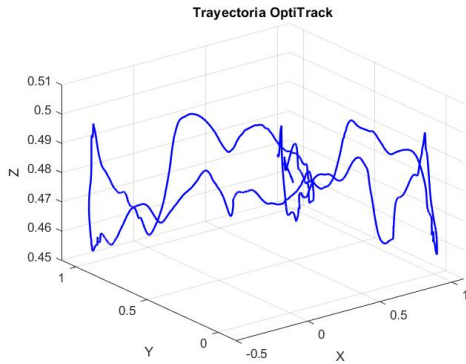


Figura 165: Marca de la rodilla izquierda procesada por OptiTrack.

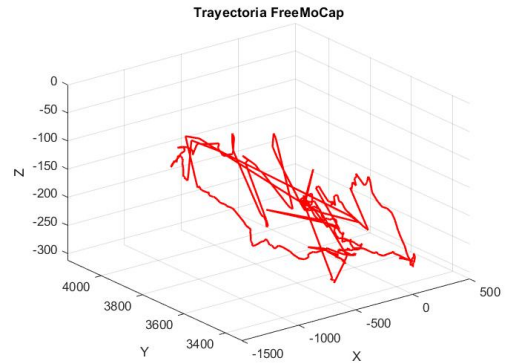


Figura 166: Marca de la rodilla izquierda procesada por FreeMoCap.

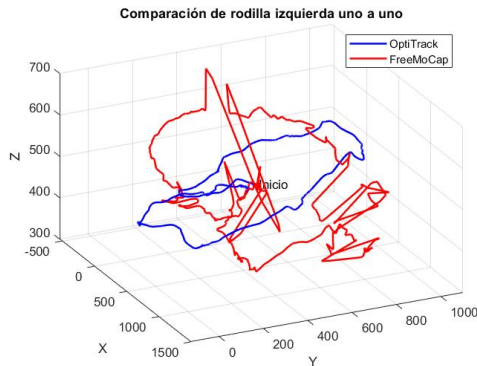


Figura 167: Comparación aproximada de la marca de la rodilla izquierda.

Esta vez en la trayectoria por OptiTrack 165 vemos una oscilación en el eje Z, que también es apreciable a su manera en 166, el cual se ubica en el extremo derecho de las figuras. Donde se ven pequeños picos que forman una forma similar.

A pesar de que anteriormente se han visto diferencias entre el tamaño del recorrido tomado, podemos ver como en la Figura 167, la gráfica perteneciente a FreeMoCap resulta ser de un mayor tamaño. Nuevamente es posible observar el cuadro que se ve presente.

8.4.18. Tobillo derecho

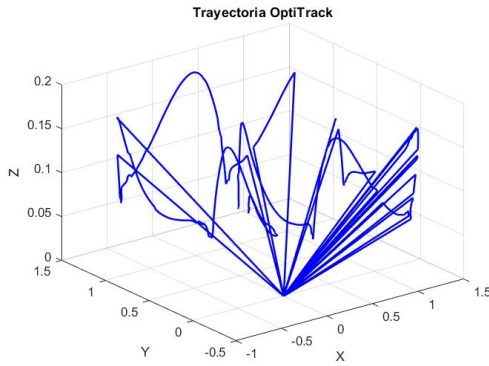


Figura 168: Marca del tobillo derecho procesada por OptiTrack.

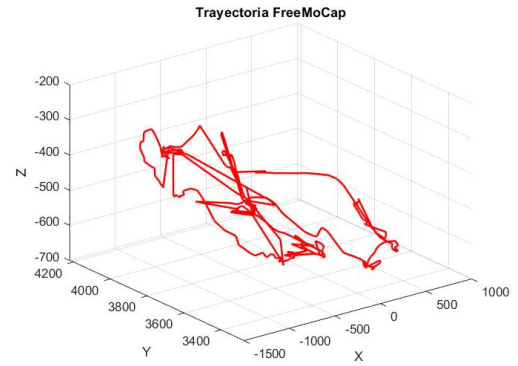


Figura 169: Marca del tobillo derecho procesada por FreeMoCap.

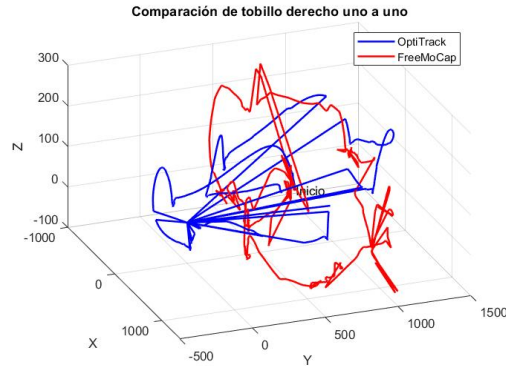


Figura 170: Comparación aproximada de la marca del tobillo derecho.

Lamentablemente el marcador colocado en el tobillo derecho no tuvo una trayectoria completa, como se ve en la Figura 168, en donde se ven muchos puntos en cero, no permitieron realizar de forma correcta la comparación con FreeMoCap 169. El cual tiene ciertos sectores con bastante ruido, pero que a pesar de esto, aún sigue una recorrido fijo.

8.4.19. Tobillo izquierdo

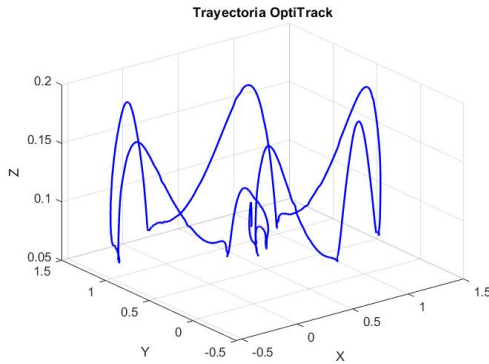


Figura 171: Marca del tobillo izquierdo procesada por OptiTrack.

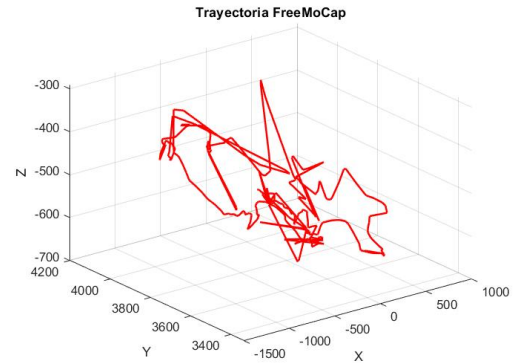


Figura 172: Marca del tobillo izquierdo procesada por FreeMoCap.

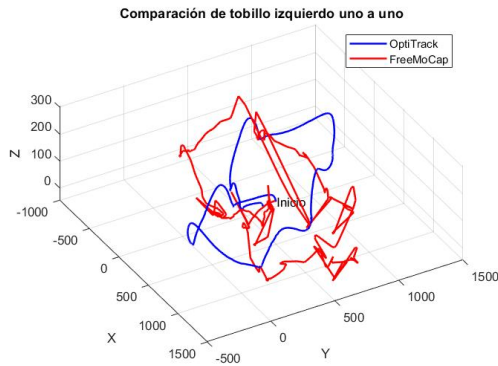


Figura 173: Comparación aproximada de la marca del tobillo izquierdo.

Contrariamente a lo ocurrido en el tobillo derecho, en esta ocasión las cámaras pudieron enfocar en todo momento el trayecto hecho por el sujeto 171. Si bien en la gráfica de FreeMoCap 172 aún presenta el ruido que ya ha sido visto con normalidad, también podemos ver algunos picos en forma de vaivén.

Este comportamiento al ser comparado con FreeMoCap 173, es posible observar comportamientos similares respecto al balanceo observable en el eje Z. Aún a pesar de los segmentos atípicos en la herramienta sin marcadores, se vuelve a observar la misma trayectoria cerrada con el desfase entre ambas.

8.4.20. Talón derecho

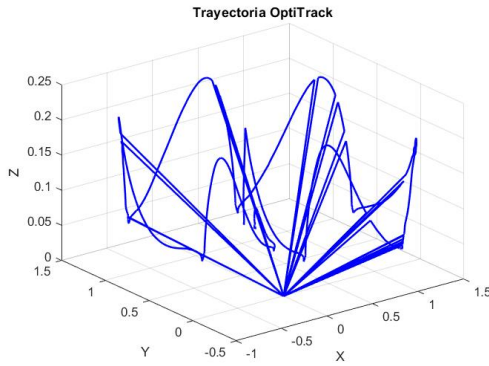


Figura 174: Marca del talón derecho procesada por OptiTrack.

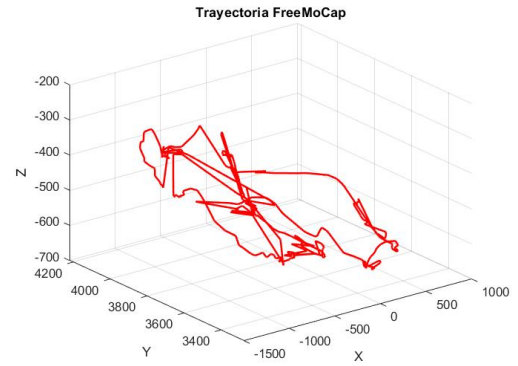


Figura 175: Marca del talón derecho procesada por FreeMoCap.

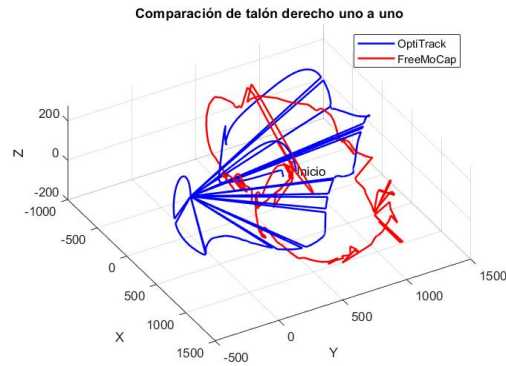


Figura 176: Comparación aproximada de la marca del talón derecho.

Así como fue visto en el tobillo, el talón derecho 174 no fue capturado por las cámaras en varios sectores, sin embargo, en esta ocasión la trayectoria está más definida. En la gráfica de FreeMoCap 175 observamos nuevamente las oscilaciones proveniente a los pasos.

Cuando se compara la trayectoria, a pesar de los puntos que se dirigen a cero y obstruyen la vista, podemos ver que existen algunos picos que coinciden en ciertos valores 176

8.4.21. Talón izquierdo

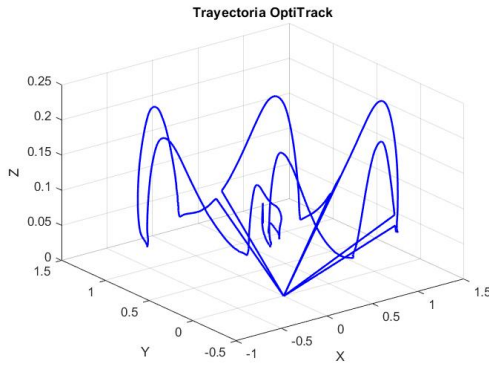


Figura 177: Marca del talón izquierdo procesada por OptiTrack.

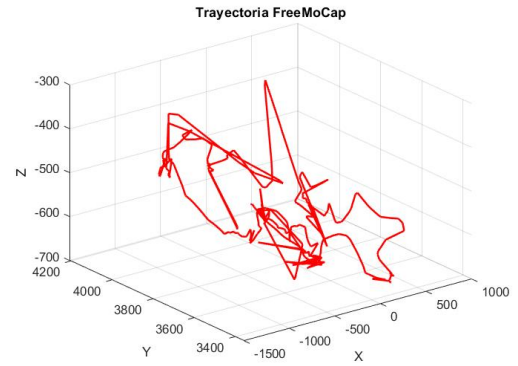


Figura 178: Marca del talón izquierdo procesada por FreeMoCap.

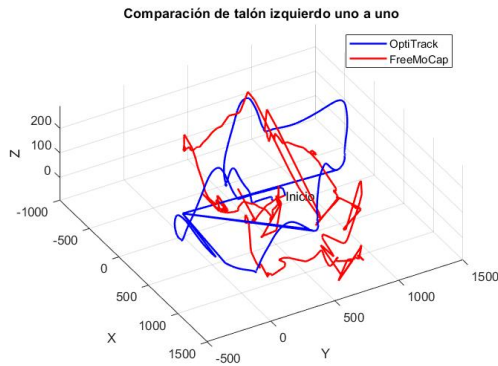


Figura 179: Comparación aproximada de la marca del talón izquierdo.

Si bien el talón izquierdo presenta de la misma forma que su contraparte algunos puntos atípicos que tienden a cero, estos son menos. También se observa las oscilaciones correspondientes a los pasos, que en OptiTrack 177 muestran una suavidad que compete de un movimiento natural humano, mientras que, en FreeMoCap es posible avistar picos que mantienen un ruido significativo en la toma de datos.

Cuando se comparan ambas gráficas en una misma escala 179 podemos observar un tamaño que parece coincidir más entre ambos. De la misma forma que se ha discutido anteriormente, es posible avistar el desfase angular.

8.4.22. Pie derecho

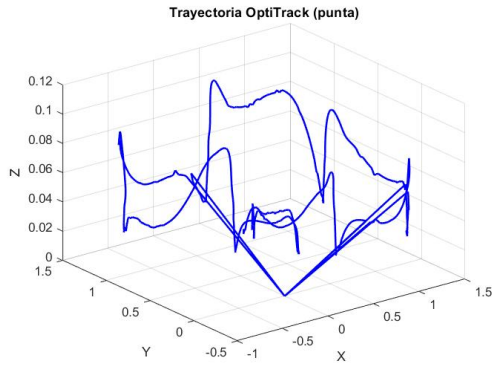


Figura 180: Marca en la punta del pie derecho procesada por OptiTrack.

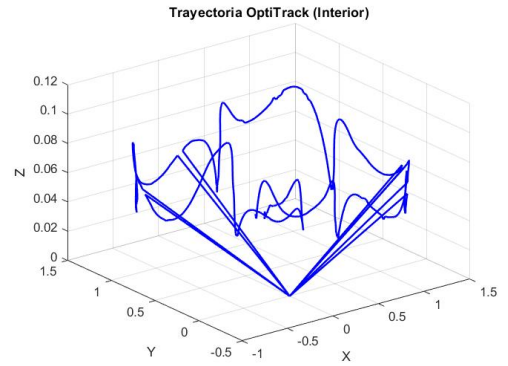


Figura 181: Marca en el interior del pie derecho procesada por OptiTrack.

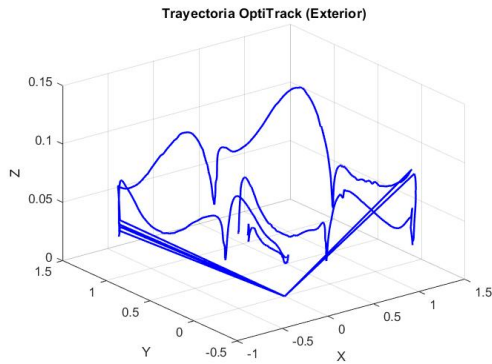


Figura 182: Marca en el exterior del pie derecho procesada por OptiTrack.

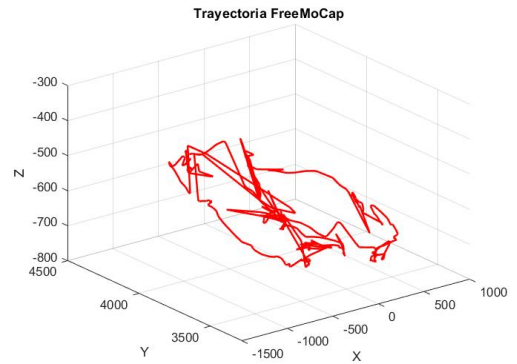


Figura 183: Marca en el pie derecho procesada por FreeMoCap.

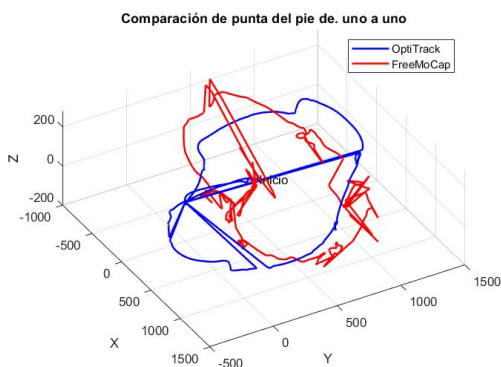


Figura 184: Comparación aproximada de la marca en la punta del pie derecho.

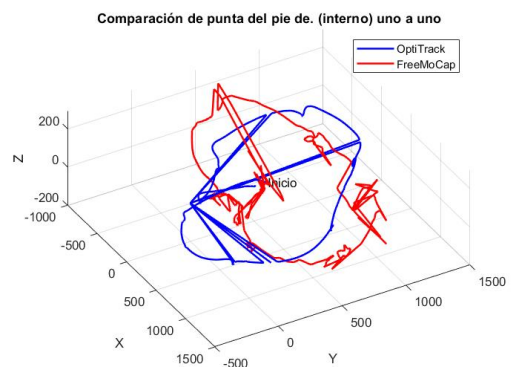


Figura 185: Comparación aproximada de la marca en el interior del pie derecho.

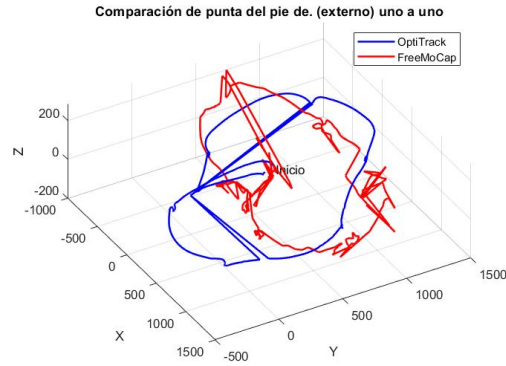


Figura 186: Comparación aproximada de la marca en el exterior del pie derecho.

Al observar las tres gráficas de OptiTrack 180, 181 y 182, vemos como las tres se complementan como se esperaba, otra vez esto es conveniente para discutir los aspectos de forma general. Aún existen puntos que no son capturados por las cámaras, pero son contrarrestados por los demás marcadores.

Cuando todos son comparados con FreeMoCap 184, 185 y 186, vemos como aún se encuentra la tendencia en las similitudes del recorrido con el desfase angular, que ahora se puede asegurar existe.

8.4.23. Pie izquierdo

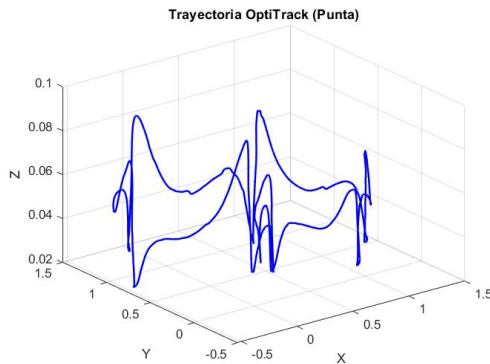


Figura 187: Marca en la punta del pie izquierdo procesada por OptiTrack.

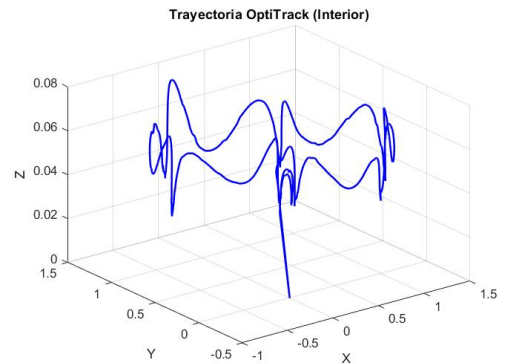


Figura 188: Marca en el interior del pie izquierdo procesada por OptiTrack.

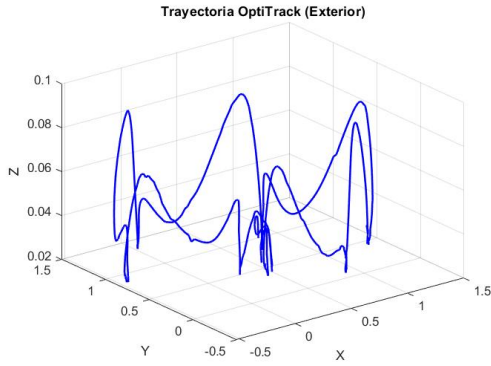


Figura 189: Marca en el exterior del pie izquierdo procesada por OptiTrack.

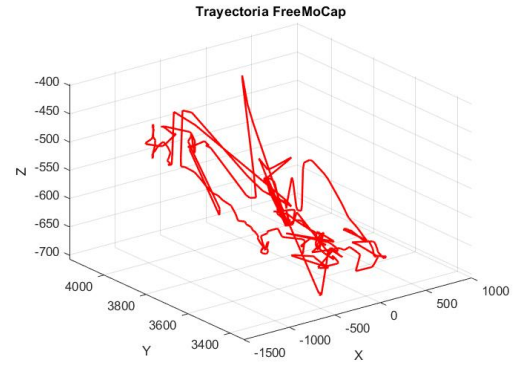


Figura 190: Marca en el pie izquierdo procesada por FreeMoCap.

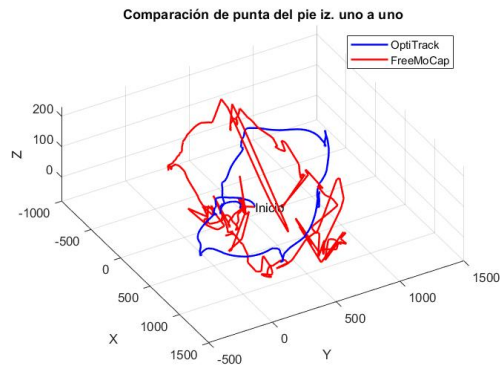


Figura 191: Comparación aproximada de la marca en la punta del pie izquierdo.

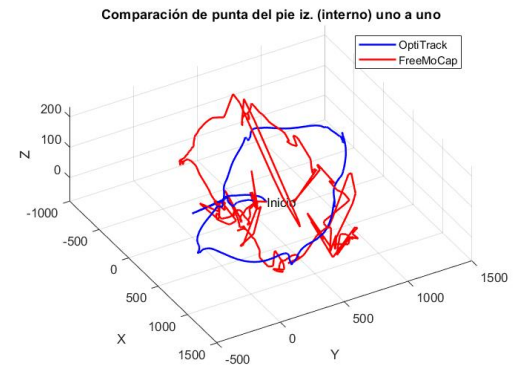


Figura 192: Comparación aproximada de la marca en el interior del pie izquierdo.

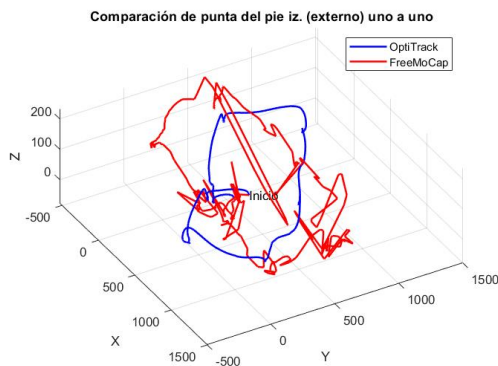


Figura 193: Comparación aproximada de la marca en el exterior del pie izquierdo.

Tras observar las gráficas del pie derecho, distinguimos como el comportamiento también es parecido entre los marcadores del pie izquierdo 187, 188 y 189, que si bien en los picos parecen ser de distintas magnitudes, aún muestra el vaivén visto por el movimiento humano. Justamente como se notó en el pie contrario, al ser comparadas las gráficas de

forma sobrepuesta 191, 192 y 193, es posible observar los mismos comportamientos entre ambos procesamientos.

Con todos los marcadores ya analizados se puede concluir que si bien FreeMoCap devuelve datos con bastante ruido, la aplicación de filtros que suavicen las trayectorias mejoran la precisión en la toma de datos. Además, el desfase existente puede deberse a la posición en la que se tomaron las muestras.

El análisis entre los sistemas FreeMoCap y OptiTrack permitió evaluar las capacidades de cada herramienta en la captura de movimiento en 3D. Colocar en el traje los marcadores en puntos estratégicamente ubicados, similares a los generados por FreeMoCap, fue esencial para garantizar que las condiciones experimentales fueran lo más equivalentes posibles, permitiendo así una comparación más precisa entre ambos programas.

Los resultados mostraron diferencias en cuanto a precisión y consistencia de los datos capturados. Mientras que OptiTrack, ofreció una mayor precisión, FreeMoCap demostró ser una alternativa prometedora al lograr capturas con un grado de fidelidad, especialmente en contextos donde se prioriza la accesibilidad y la reducción de costos.

1. Si bien existen diversas herramientas que se adaptan a la captura de movimiento sin marcadores, varias de estas también son poco accesibles. Tanto por el costo debido a la precisión de captura, calidad de aprendizaje automático utilizado en el programa o equipo sofisticado que busca ayudar a la toma de datos. Sin embargo, FreeMoCap ha logrado sobreponerse en estos aspectos, permitiendo un fácil acceso y una alternativa viable.
2. Se identificaron discrepancias en los datos registrados entre las herramientas Tracker y FreeMoCap, que se demuestran con un poco porcentaje de error y que difieren poco en los resultados estadísticos, atribuibles a diferencias en los algoritmos de procesamiento. Estos hallazgos evidencian la capacidad de las herramientas con aprendizaje automático para mejorar el comportamiento para los análisis de movimientos corporales.
3. Los resultados provenientes a la comparación entre OptiTrack y FreeMoCap, que aunque no sean comparables en cuanto a exactitud en la ubicación debido a diferencias entre la configuración de marcadores, demuestra ser una buena alternativa para próximos estudios que no necesiten una precisión absoluta, ahorrando gastos y necesidad de equipo de alto desempeño.

CAPÍTULO 10

Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos durante este trabajo se proponen las siguientes recomendaciones que pueden ayudar a continuar utilizando la herramienta FreeMoCap o parecidas para futuras investigaciones:

1. Para cada análisis, efectuar las grabaciones deseadas para después realizar el procesamiento de datos por medio de FreeMoCap disminuirá el riesgo de pérdida de información.
2. Utilizar dispositivos de mejor calidad pueden reducir el ruido y alteraciones en la toma de datos. Si bien el uso de cámaras web permitió realizar lo deseado, estas limitan la calidad y distinción del sujeto. Por lo que si se cuentan con unas de mayor resolución, pueden ayudar a mejorar los resultados.
3. Si el dispositivo lo permite, utilizar más cámaras para crear espacios de grabación en los que se logre una mayor captura de datos. Además de abarcar más espacio para que se puedan realizar más movimientos sin salirse del encuadre permitido.

-
- [1] C. Perafán, “Robotat: un ecosistema robótico de captura de movimiento y comunicación inalámbrica,” Tesis doct., Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala, 2022.
 - [2] FreeMoCap, *FreeMoCap Main Documentation*, Github Documentation, Fecha de acceso: 01/04/2024, feb. de 2024. dirección: <https://freemocap.github.io/documentation/>.
 - [3] S. Orellana, “Control del robot humanoide NAO mediante poses humanas captadas por cámara,” Tesis doct., Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala, 2021.
 - [4] D. Jorge, “Aprendizaje automático y aprendizaje profundo,” *SciElo*, vol. 29, n.º 02, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052021000200180>.
 - [5] S. L. Alexander Amini Ava Amini, *Introduction to Deep Learning*, MIT’s introductory program, Fecha de acceso: 04/06/2024, Abril de 2024. dirección: <http://introtodeeplearning.com/>.
 - [6] IBM, *El modelo de redes neuronales*, Documentación, Fecha de acceso: 04/06/2024, Agosto de 2021. dirección: <https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=networks-neural-model>.
 - [7] MathWorks, “¿Qué son las redes neuronales convolucionales?” *MathWorks*, 2024, Fecha de acceso: 12/05/2024. dirección: <https://es.mathworks.com/discovery/convolutional-neural-network.html>.
 - [8] S. Agarwal, “What is a Charuco board and why you should use it?” *Deepen*, 2022, Fecha de acceso: 12/05/2024. dirección: <https://www.deepen.ai/blog/what-is-a-charuco-board-and-why-you-should-use-it>.
 - [9] R. M. H. Douglas Brown Wolfgang Christian, *Tracker*, ver. 5.1.5, 2024. dirección: <https://physlets.org/tracker/>.
 - [10] O. S. Initiative, *The open source definition*, Documentación, Fecha de acceso: 04/06/2024, jul. de 2006. dirección: <https://opensource.org/osd>.
 - [11] OSI, *Open Source Initiative*, Fecha de acceso: 04/06/2024, 2024. dirección: <https://opensource.org/>.
 - [12] Theia3D, *TheiaMarkerless*, ver. 2024, 2019. dirección: <https://www.theiamarkerless.ca/>.

- [13] B. Leyland, *Move AI*, ver. 2024, 2023. dirección: <https://www.move.ai/>.
- [14] Captury, *Captury*, ver. 2024, 2023. dirección: <https://captury.com/>.
- [15] AR-51, *AR-51*, ver. 2024, 2021. dirección: <https://www.ar-51.com/>.
- [16] A. Russ, *Simi Reality Motion Systems*, ver. 2024, 2019. dirección: <https://simishape.com/>.
- [17] IpiSoft, *IpiSoft*, ver. 2.2, 2024. dirección: <https://www.ipisoft.com/>.
- [18] Remocapp, *Remocapp*, ver. 2.0, 2024. dirección: <https://remocapp.com/>.
- [19] *MediapipeHolistic*, Google Research, Fecha de acceso: 06/10/2024, Abril de 2023. dirección: <https://github.com/google-ai-edge/mediapipe/blob/master/docs/solutions/holistic.md>.
- [20] *MediapipePose*, Google Research, Fecha de acceso: 06/10/2024, mayo de 2023. dirección: <https://github.com/google-ai-edge/mediapipe/blob/master/docs/solutions/pose.md>.
- [21] *MediapipeFaceMesh*, Google Research, Fecha de acceso: 06/10/2024, mayo de 2023. dirección: https://github.com/google-ai-edge/mediapipe/blob/master/docs/solutions/face_mesh.md.
- [22] *MediapipeHands*, Google Research, Fecha de acceso: 06/10/2024, mar. de 2023. dirección: <https://github.com/google-ai-edge/mediapipe/blob/master/docs/solutions/hands.md>.
- [23] *Baseline*, OptiTrack documentation, Fecha de acceso: 06/10/2024, OptiTrack, Abril de 2024. dirección: <https://docs.optitrack.com/markersets/full-body/baseline-41>.
- [24] A. Barre, *Mokka*, ver. 0.6.2, 2013. dirección: <https://biomechanical-toolkit.github.io/mokka/index.html>.

