

الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
قسم النظم الالكترونية والميكانيكية
اختصاص الميكاترونكس

مشروع تخرج

تصميم وتنفيذ روبوت سداسي الأرجل متنقل

Hexapod Walking robot

تقديم: عهد البدين

م. عماد الدين العبدان

م. باسل النحاس

بإشراف: د. عبدالله حورية

2014

"الإهداء"

إلى أغلى ما أملك أبي وأمي وأخوتي.....

إلى جميع أصدقائي وزملائي.....

إلى كل من يتطلع نحو المستقبل.....

كلمة الشكر

أتقدم بالشكر إلى رئيس قسم النظم الالكترونية والميكانيكية الدكتور إبراهيم شعيب على دعمه لهذه المبادرة وعلى ملاحظاته القيمة.....

أوجه شكري وتقديرني الذي لا تعب عنـه الحروف إلى المشرفين اللذين لم يخلوا بالعون لإنجاز هذا العمل

"د. عبدالله حورية" "د. عماد الدين العبدان" م. باسل النحاس م. عماد الدين

أوجه شكر للمهندسين إياد سبيع ومازن اللوحي لتأمين مستلزمات المشروع.....

كما أوجه شكري إلى كل من ساعدي من أساتذة وزملاء ومنهم زيون البابا، باسل الشيخ قاسم

الخلاصة

تتميز الروبوتات سدايسية الأرجل بالاستقرار الستانيكي نظراً لعدد الأرجل، حيث يكون مركز العطالة دائماً ضمن مطلع مشكل من قبل ثلاثة أرجل على الأقل. تتوضع الأرجل السنت على رؤوس مسدس منتظم (الجسم) وتمتلك كل رجل ثلاث درجات حرية دورانية مفعولة (18 محرك سيرفو). تستخدم لعملية السير النمط (3×3) ثلاثة أرجل على الأرض وثلاثة في الهواء للسير في أي اتجاه والدوران.

بعد إجراء نمذجة حركية للروبوت المكون من ست سلاسل حركية ودراسة فضاء العمل، استطعنا بناء النماذج الهندسية التي يمكن من خلالها توليد المسارات الحركية اللازمة لحركة السير في أي اتجاه والدوران. وبالتالي يمكن معرفة المواقع والسرعات الزاوية الرابطة التي يتم إرسالها للحركات في كل نقطة من المسار.

تم إنجاز تصميم ميكانيكي بالحلول الممكن تصنيعها وغير المكلفة زمنياً. بالإضافة إلى الدارة الرئيسية التي تستقبل الأوامر لاسلكياً من دارة الإرسال، لتنстطيع حساب المسارات اللازمة وإرسالها للحركات (Digital Smart Servo Motor AX-12A). هذه الحركات تتبع التوصيل الشبكي وتستقبل إطار معطيات يحتوي المعلومات اللازمة لحركة.

نعرض أيضاً كيفية السير ضمن بيئه وعرة غير معّرفه، ثم خوارزمية صعود عقبة معرفة الأبعاد والمرور تحت عائق مع المسارات المستخدمة لتنفيذ هذه المهمه. أضف إلى ذلك قابلية صعود ونزول مستوى مائل بتغيير تموضع مركز عطالة الجسم أثناء الحركة. حيث استطعنا بناء برنامج محاكاة ثلاثي الأبعاد باستخدام C# يمكن من خلاله دراسة الحركات المعقدة كصعود عقبة- ثم تجربتها.

Abstract

Six-legged robots are characterized by static stability due to the number of legs, where the center of inertia is always within the polygon formed by at least three legs. The six legs are located on the heads of a hexagonal (the body) and every leg possesses three degrees of freedom (18 servo motor). We use the tripod gait (3x3), three legs on the ground and the others in the air for walking in any direction and rotating.

After modeling the movement of the robot that is composed of six kinematic strings, and implement a kinetic study of work space, we were able to build engineering models that can generate kinetic paths for walking in any direction and rotating. Thus, we can know the positions and the angular velocities that are sent to the motors at each point of the path.

We completed the mechanical design, and found the solutions that can be manufactured and has the least time-cost. In addition, we designed the main circuit that receives commands from a wireless transmitter circuit, to be able to calculate the necessary paths and sent it to the motors (Digital Smart Servo Motor AX-12A). These motor have network connection and receive data frame that contains the information necessary for the movement.

We also present how the robot can cross rough terrains. Then the algorithm for overcoming a defined obstacle and passing under an obstacle. In addition, the ability for ascending or descending inclined plane by repositioning the center of the inertia during movement. We were able to build a three-dimensional simulation program using C#, so we can study the complex movements before we implement it.

قائمة المحتويات

ii.....	الإهداء
iii.....	كلمة الشكر
iv.....	الخلاصة
v.....	<i>Abstract</i>
vi.....	قائمة المحتويات
ix.....	قائمة الأشكال
xii.....	قائمة العداول
1.....	الفصل الأول
1.....	التعریف بالمشروع
2.....	1- مقدمة عامة 1-1
3.....	2- أنماط الحركة 2-1
3.....	3- النمط الثلاثي (3x3) (<i>Tripod gait</i>) 3-2-1.
5.....	4- الهدف 3-1
5.....	5- دفتر الشروط الوظيفية 4-1
5.....	5- المخطط العام للنظام 5-1
7.....	الفصل الثاني
7.....	2- النموذج الهندسي والحركة
8.....	1- المخطط الحركي للنظام 1-2
8.....	2- الحركة Mobility 2-2
9.....	3- النموذج الهندسي المباشر لرجل واحدة (في الهواء) بالنسبة لجملة الجسم 3-2
12.....	4- النموذج الهندسي العكسي لرجل واحدة بالنسبة لجملة الجسم 4-2
14.....	5- النموذج الحركي العكسي لرجل واحدة 5-2
15.....	6- النموذج الهندسي العكسي الكلي 6-2
18.....	7- النموذج الحركي العكسي الكلي 7-2
19.....	8- النموذج الهندسي العكسي المعمم 8-2
20.....	9- حساب العزم المطلوب من المفاعلات 9-2
23.....	10- فضاء العمل 10-2

23	2-10-1. القيد الميكانيكي
24	2-10-2. تأثير الأبعاد الهندسية
25	2-10-3. خطوة السير
27	2-11-1. توليد المسارات
27	2-11-2. السير باستخدام النمط الثلاثي (3x3)
33	2-11-2. الدوران في المكان باستخدام النمط الثلاثي
35	2-11-3. نمط الأرضي الوعرة
37	2-12-1. المحاكاة باستخدام UniGraphics
38	الفصل الثالث
38	3- التصميم الميكانيكي
39	3-1- مقدمة
39	3-2- الطول والتصميم
39	3-2-1. الشكل العام
40	3-2-2. تصميم الروابط
44	3-2-3. القاعدة السفلية والعلوية
45	3-3- التجميع
49	الفصل الرابع
49	التصميم الإلكتروني
50	1-4- المخطط الصنديقي
50	2-4- اختيار المتحكم الصغرى
51	3-4- التغذية والبطاريات
52	4-4- التخاطب مع الحاسوب
53	5-4- المحركات
57	6-4- التخاطب مع المحركات
61	7-4- التحكم اللاسلكي
62	7-4-1. بروتوكول التخاطب اللاسلكي
63	7-4-2. اختيار المتحكم الصغرى لدارة التحكم اللاسلكي
64	7-4-3. التغذية والتخاطب مع الحاسوب
67	الفصل الخامس
67	الجزء البرمجي
68	1-5- مقدمة
68	2-5- مخطط الحالة
69	3-5- الواجهة التخاطبية والمحاكاة (OpenTK)
75	الفصل السادس
75	نتائج التجربة والمناقشة

76.....	1-6 النتائج العلمية
78.....	2-6 خطأ التموضع والتوجيه
79.....	3-6 التحكم اللاسلكي
79.....	4-6 الجزء البرمجي
80.....	5-6 نتائج المحاكاة باستخدام <i>Open.Tk</i>
81.....	6-6 صعود عبة معرفة
84.....	الخاتمة والآفاق المستقبلية
1.....	المراجع
A.....	الملحقات
A.....	الملحق (أ) النشرة الفنية للمحرك المستخدم AX-12A
E.....	الملحق (ب) الدارات الإلكترونية
J.....	الملحق (ج) الرسوم التجميلية والإفرادية

قائمة الأشكال

الشكل 1: بنية رجل العنكبوت والمخطط الحركي لها.....	2
الشكل 2: بعض الروبوتات سدايسية الأرجل التي تم تطبيقها.....	3
الشكل 3: مركز العطالة (CoM) الواقع ضمن منطقة التوازن المشكلة من قبل ثلاثة أرجل.....	4
الشكل 4: تسلسل الأرجل في النمط الثلاثي وفي حالة $\theta=0.5$	4
الشكل 5: يبين المخطط العام للنظام.....	6
الشكل 6: المخطط الحركي للنظام، حيث يظهر الشكل الأيمن المخطط الحركي لرجل واحدة. بينما يظهر الشكل الأيسر المخطط الحركي الكلي.....	8
الشكل 7: المخطط الحركي لرجل واحدة متصلة بالجسم مع توضع الجمل.....	10
الشكل 8: يبين الحلين الممكنين لنفس تموير نهاية الرجل، اختار الحل الذي يعطي زاوية وقوف أكبر (الزاوية بين الرجل والمستقيم العمودي على الأرض).....	14
الشكل 9: يبين المخطط الحركي لرجل واحدة على تماش مع الأرض، وبين أيضاً توضع الجمل المعرفة سابقاً.....	16
الشكل 10: نقطة نهاية الرجل متوضعة في مستوى غير مستوي الأرض، مما يعطي عمومية للنموذج.....	19
الشكل 11: القوة F التي يجب على المحركين الأول والثاني تطبيقها من أجل رفع الجسم للأعلى (أي التغلب على الوزن).....	20
الشكل 12: العزم المطبق على المحرك الأول.....	22
الشكل 13 منحني ($L_3=L_{2max}$) من أجل معلم أمان $=1.5$ دل المفعل 2 يمكن اختيار $2 = 0.076m$, $L_2 = 0.1m$, $L_3 = 0.1m$ مثلاً.....	23
الشكل 14: يوضح القيد الميكانيكي على الرابطة الأولى الناتج عن تصادم الأرجل أثناء السير.....	24
الشكل 15: حالة L_{Li-min} إلى اليمين و L_{Li-max} إلى اليسار في الحالتين لا يستطيع الروبوت الحركة.....	25
الشكل 16: يوضح منطقة التوازن المشكلة من تقاطع المثلثين المتساوي الأضلاع، المسافة الأعظمية لخطوة هي OM.....	26
الشكل 17: كيفية تطبيق المسار وحساب المتحولات الرابطية لكل رجل q.....	27
الشكل 18: شكل يبين المسار الذي يجب أن تسلكه نقطة نهاية الرجل خلال خطوة من أجل ثلاثة معينة. المسار العلوي هو مسار بسيط على شكل قطع مستقيمة، أما المسار السفلي فهو عبارة عن قطع مكافئ لكنه مفيد في حالة وجود أرض وعرة.....	28
الشكل 19: يبين المسار البسيط (اليسار) والقطعي (اليمين) لمركز الجسم العلوي. المسار في الأعلى لثلاثية الاستناد، بينما المسار في الأسفل هو مسار وهي للحصول على المتحولات الرابطية للثلاثية المتأرجحة وذلك لتسهيل الحسابات.....	29
الشكل 20- يبين مسار الحركة لثلاثية واحدة المطبق على النموذج الهندسي العكسي الكلي (ارتفاع الخطوة $h=20mm$ ، طول الخطوة $110mm$).....	29
الشكل 21- مسار الجسم وسرعته بالنسبة للزمن، ذلك من أجل دور حركة $T=0.55$ وبخطوة قدرها $110mm$	30
الشكل 22: اتجاه الحركة بحسب المحور U الذي يصنع مع المحور X زاوية $\theta=45^\circ$	30
الشكل 23- تغير الارتفاع Z للجسم بالنسبة للزمن من أجل دور $T=0.55$ وارتفاع خطوة $h=20mm$. يضاف للمسار السابق ارتفاع الجسم عن الأرض.....	32
الشكل 24: يبين المسار المطبق على الجسم في الفضاء (X,Y,Z) الذي من خلاله نستطيع الحصول على كافة المتحولات الرابطية باستخدام النموذج العكسي. اتجاه الحركة $\theta=45^\circ$ ، مقدار الخطوة $110mm$ ، وارتفاع الخطوة $h=20mm$	32
الشكل 25: يبين تغير زوايا رجل معينة ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) والسرعات الزاوية من أجل خطوة كاملة وبدور حركة $T=2s$	33
الشكل 26: يوضح الخطوة الأولى لعملية الدوران في المكان بزاوية α	34
الشكل 27: المسار المطبق على النموذج العكسي الكلي لثلاثية الأولى (المستند على الأرض) من أجل دور حركة $T=0.5s$ وزاوية دوران $\alpha=30^\circ$	35
الشكل 28: المسار المطبق على النموذج العكسي للثلاثية الثانية (المتأرجحة) في الفضائيين (α, β, γ) من أجل الدوران (X,Y,Z) من أجل التأرجح في الهواء. بدور حركة $T=0.5s$ زاوية دوران $\alpha=30^\circ$ وارتفاع عن الأرض $h=30mm$	35

الشكل 29: يبين المسار المتكرر للجسم بالنسبة لجملة مرجعية خارجية	36.....
الشكل 30: المسار المطبق على الجسم (الثلاثية الأولى) من أجل نمط الأرضي الوعرة، مقدار الخطوة (110mm) وارتفاع الخطوة يصبح (h=40+60=100mm) واتجاه سير 45°.	36.....
الشكل 31: المسار المطبق على Z بالنسبة للزمن من أجل دور حركة سير T=1sec (h=40+60=100mm) ، ارتفاع خطوة	37....
الشكل 32: المحاكاة الحركية لحركة السير والدوران بالنظام الثلاثي، بستخدام UniGraphics.	37.....
الشكل 33: يظهر طين للشكل العام لجسم الروبوت، المستطيل والمسدس المنتظم.	39.....
الشكل 34: المحرك المستخدم AX-12A.....	40.....
الشكل 35: طريقة الربط مع المحرك المستخدم من الجهازين، من النشرة الفنية للمحرك	41.....
الشكل 36: الحل الأول لتصميم الرابطة الأولى.....	41.....
الشكل 37: الحل الثاني لتصميم الرابطة الثانية.....	42.....
الشكل 38: الحال المقترن من أجل الرابطة الثانية وختار الحل الموجود على اليسار.....	42.....
الشكل 39: تصميم الرابطة الثالثة بين المحرك الثالث والأرض.....	43.....
الشكل 40: تطبيق قوة في الاتجاه المبين، أسوأ حالة هي أن يكون الروبوت مستندًا على ثلاثة أرجل.....	44.....
الشكل 41: الإجهاد المكافئ حسب Von-Mises.....	44.....
الشكل 42: شكل القاعدة المسدس المنتظم.....	45.....
الشكل 43: الإجهاد المكافئ بحسب Von-Mises.....	45.....
الشكل 44: تجميع الرابطة الأولى.....	46.....
الشكل 45: تجميع الرابطة الثانية.....	46.....
الشكل 46: تجميع الرابطة الثالثة.....	47.....
الشكل 47: تجميع الرجل مع الجسم المؤلف من القاعدة السفلية والعلوية.....	47.....
الشكل 48: التصميم النهائي بعد التنفيذ والتجميع.....	48.....
الشكل 49: المخطط الصنديقي للدارة الكهربائية.....	50.....
الشكل 50: يوضح مداخل المتحكم الصغير المستخدم Atmega128.....	51.....
الشكل 51: البطارية المستخدمة المؤلفة من ثلاثة خلايا قابلة للشحن.....	52.....
الشكل 52: دارة منظم الجهد الدارة الرئيسية.....	52.....
الشكل 53: طريقة وصل الدارة المتكاملة Max232 لتأمين التخاطب التسلسلي مع الحاسوب.....	53.....
الشكل 54: الإطار المستخدم للتخاطب من الحاسوب إلى المتحكم الصغير Amtega128.....	53.....
الشكل 55: يبين المخطط التحكمي للروبوت، يتم حساب قيم زوايا وسرع كل محرك عبر النموذج العكسي (IK) ثم إرسالها إلى حلقة التحكم الداخلية الخاصة بالمحرك.....	54.....
الشكل 56: المحرك DC servo.....	55.....
الشكل 57: محرك السيرفو الذي AX-12A المستخدم.....	55.....
الشكل 58: مداخل المحرك وطريقة التوصيل التسلسلي لعدة محركات.....	56.....
الشكل 59: طريقة التوصيل الشبكي النجمية المستخدمة بين الدارة الرئيسية (Master) والمحركات (slave).	56.....
الشكل 60: دارة تأمين التراسل Half Duplex بين المحرك والمتحكم الصغير.....	57.....
الشكل 61: طريقة التخاطب بإرسال ثم استقبال حزمة تعليمات وحزمة معطيات، حيث يتم إرسال حزمة التعليمات إلى كافة الوحدات المتصلة ويتم التلقى بحسب المعرف الخاص بالمحرك. يتم إرسال حزمة الحالة من قبل الوحدة مباشرة بعد تلقى الحزمة السابقة ..	57.....
الشكل 62: شكل إطار المعطيات المرسل للمحرك (Instruction Packet) والمستقل من المحرك (Status Packet) .	58.....
الشكل 63: مضمون حزمة التعليمات المرسلة لكافة المحركات المتصلة باستخدام التعليمية SYNC_WRITE	59.....
الشكل 64: مخطط الدارة الرئيسية باستخدام برنامج Proteus	60.....
الشكل 65: مخطط الدارة المطبوعة للدارة الرئيسية باستخدام برنامج CADSTAR	61.....
الشكل 66: المخطط الصنديقي لدارة الإرسال اللاسلكي.....	62.....
الشكل 67: يبين كيفية انتقال المعطيات (1byte) من الحاسب الرئيسي إلى الدارة الرئيسية (دارة الروبوت).....	62.....
الشكل 68: طريقة الترميز المتبعة للإرسال اللاسلكي.....	63.....
الشكل 69: يبين وحدة الاستقبال إلى اليمين (GD-R5D)، ووحدة الإرسال إلى اليسار (GD-TX6).....	63.....

64.....	الشكل 70: يبين مدخلات المعالج Atmega8 من النشرة الفنية
65.....	الشكل 71: مخطط دارة الإرسال.....
66.....	الشكل 72: مخطط الدارة المطبوعة لدارة الإسال.....
69.....	الشكل 73: مخطط الحالة للبرنامح.....
70.....	الشكل 74: الواجهة التخاطبية التي تم بناؤها باستخدام C#.....
73.....	الشكل 75: الواجهة التخاطبية التي تم بناؤها باستخدام C، والتي تسمح بتغيير إعدادات المحرك وتجريمه. تظهر عند النقر على الزر <i>setting up</i> في الواجهة الأساسية.....
74.....	الشكل 76: يبين الشكل مخطط الصفوف الخاصة بعملية المحاكاة.....
76.....	الشكل 77: نهاية الرجل المغطسة بمادة السيليكون المطاطي.....
77.....	الشكل 78: السير في أرض وعرة غير معروفة باستخدام نمط الأرضي الوعرة.....
77.....	الشكل 79: النزول تحت عائق ارتفاعه 12cm.....
78.....	الشكل 80: صعود مستوى مائل بزاوية 30 درجة، حيث يتم نقل مركز العطالة وتغيير التوجيه أثناء عملية الصعود.....
78.....	الشكل 81: خطأ التموضع والتوجيه الناتج عن إجراء أم انسحاب حيث اتجاه الحركة.....
79.....	الشكل 82: إرسال مجموعة بنايات (0001111000) حيث يظهر الإشارة المرسلة في الأسفل والمستقبلة في الأعلى.....
83.....	الشكل 83: خوارزمية صعود عقبة نظرياً وعملياً.....

قائمة المحتوى

الجدول 1: مصفوفة Denavit-Hartenberg لرجل واحد 10

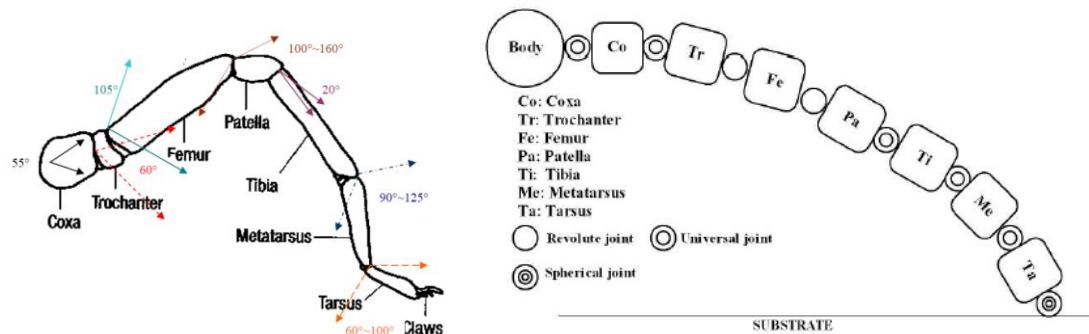
الفصل الأول

التعریف بالمشروع

1-1 - مقدمة عامة

بدأ الإنسان بتصميم الروبوتات لتكون المساعد المعتمد له في إجراء المهام الصعبة والذهب إلى الأماكن الخطرة، ليتطور الأمر لاحقاً ليستبدلها عن نفسه لتقوم بهذه المهام ذاتياً لضمان حياته. أثبتت هذه الروبوتات القدرة على تكرار العمليات بدقة أعلى وبسرعة أكبر، لهذا فإنه كان من بعض المتطلبات الوظيفية لتلك الروبوتات أن تمتلك القدرة على السير في الأراضي الوعرة الطبيعية وتجنب العوائق بمعنى آخر كشف المحيط وتحديد المسار الآمن لتنفيذ المهام.

إن الحيوانات مثل جيد لاستيعاد التصميم حيث أنها تمتلك الخصائص التي نبحث عنها. تم إنجاز العديد من التصميمات المختلفة والناجحة لروبوتات تعمل محاكية للحيوانات ومنها الروبوتات المشابهة للعنكبوت. تتميز هذه الروبوتات بسهولة السير في الأراضي الوعرة، لكن هل هناك ضرورة لنسخ بنية العنكبوت كاملة؟ يمتلك العنكبوت ثماني أرجل، وتحتاج كل رجل 12 درجة حرية [01] كما مبينة في (الشكل 1 الشكل 1) وهذا عدد كبير جداً. من أجل ذلك، تم تصميم روبوتات تحاكي بنية رجل العنكبوت ولكن بشكل مبسط وحتى بست أرجل وتسمى (Hexapod Robots).



الشكل 1: بنية رجل العنكبوت والمخطط الحركي لها.

إن *Hexapod robot* عبارة عن روبوت له ست أرجل تمكّنه من السير على الأرض غير المستوية كما مبين في (الشكل 2 الشكل 2). الفائدة الرئيسية من هذا النوع من الروبوتات هي الاستقرار الستاتيكي، بعكس الروبوتات التي تسير على أربع أرجل. وبالتالي ليس هناك حاجة لتأمين الاستقرار عن طريق القفز أثناء السير مثلاً. يمكن استخدام هذه الأنواع في عدة تطبيقات في الحياة منها كشف البيئة المحيطة.



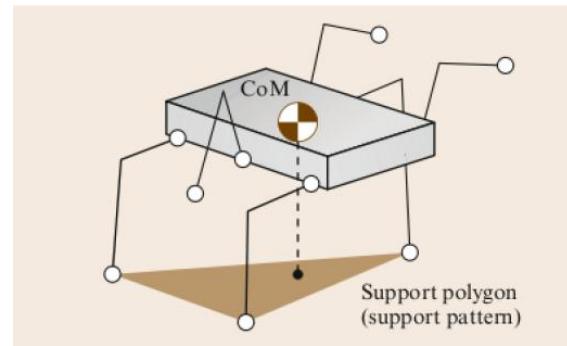
الشكل 2: بعض الروبوتات سداسية الأرجل التي تم تطبيقها.

2-1. أنماط الحركة

يعرف نمط الحركة بأنه التسلسل التي تسلكه الأرجل لأي حيوان للتمكن من عملية السير. تختلف أنماط الحركة بحسب عدد الأرجل وتوجد عدة أنماط مختلفة يتم تطبيقها على الروبوتات رباعية الأرجل وسداسية الأرجل. سنتكلم فيما يلي عن أحد الأنماط الستانتيكية (السكونية) التي يمكن تطبيقها على الروبوتات سداسية الأرجل (*Hexapod*) وهي (3×3) (باقي الأنماط هي 4×2 و 5×1 وهي موضحة في [03]). المشترك بين كل الأنماط أن مركز العطالة يجب أن يكون ضمن منطقة التوازن المعرفة بالخطوط الواقلة بين الأرجل الملامسة للأرض. تتميز الروبوتات سداسية الأرجل عن رباعية بمنطقة توازن أكبر، حيث أن أكبر عدد أرجل على تماس مع الأرض للسير هو: ثلاثة لروبوتات رباعية، وخمس لروبوتات سداسية. وبالتالي تتميز الروبوتات سداسية بأنها أكثر استقراراً.

2-1-1. النمط الثلاثي (*Tripod gait*)

هذا النمط مستوحى من حركة الصرصور وفيه تكون ثلاثة أرجل على الأرض وثلاث مرتفعة بالتناوب. بحيث يقع مركز العطالة ضمن المثلث المثلث من قبل كل ثلاثة كما موضح في (الشكل 3). يتم رفع إحدى الثلاثيات في الهواء وتحريكها للأمام وفي هذه الأثناء ينسحب كامل الجسم للأمام بواسطة الثلاثية الثانية (التي تحمل الجسم)، إلى أن تهبط الثلاثية الأولى إلى الأرض وتتكرر الحركة.



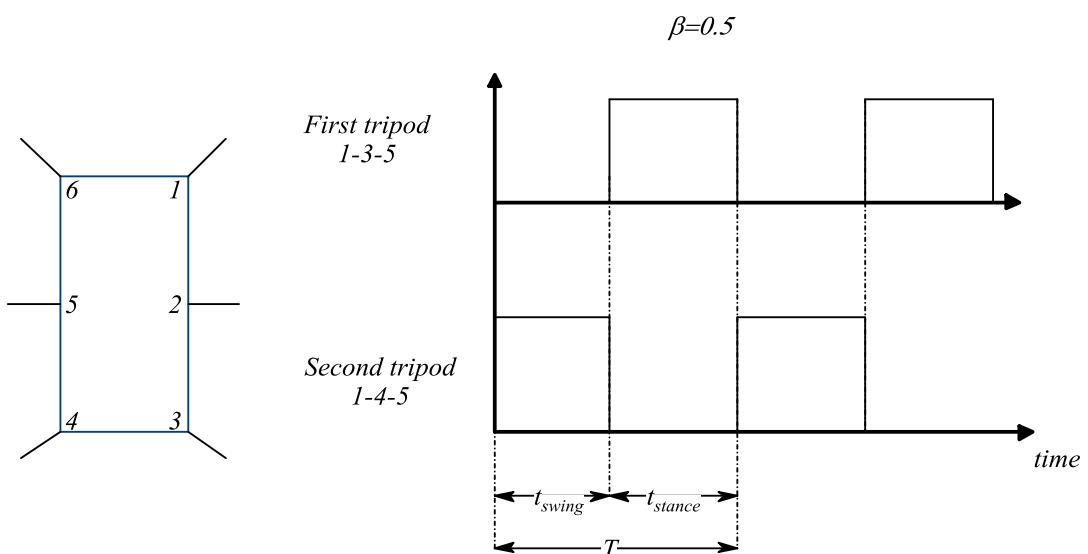
الشكل 3: مركز العطالة (CoM) الواقع ضمن منطقة التوازن المشكّلة من قبل ثلاثة أرجل.

يتم تطبيق التسلسل المبين في (الشكل 4) حيث تشير الإشارة العالية إلى الرجل في الهواء والمنخفضة إلى الرجل على الأرض. يعرف دور الحركة T بالزمن اللازم حتى إنتهاء تكرار التسلسل، t_{stance} الزمن الذي تقضيه الرجل على الأرض، t_{swing} الزمن الذي تقضيه الرجل في الهواء. وبالتالي تعرف السرعة الخطية للجسم V بالعلاقة التالية [03]:

$$V = \frac{L}{T} = \frac{L}{t_{swing}}(1-\beta)$$

حيث L : هو الخطوة في الدور الكامل.

$\beta = t_{stance}/T$ أو $t_{swing}=T(1-\beta)$ β : معامل بقاء الرجل على الأرض وبالتالي



الشكل 4: تسلسل الأرجل في النمط الثلاثي وفي حالة $\beta=0.5$

نميز من العلاقة السابقة حالة $\beta < 0.5$, وفيه تكون الأرجل الست في الهواء في لحظة ما ويعرف بالنمط الديناميكي. أم في حالة $\beta > 0.5$ وهو النمط الستاتيكي وفيه يكون هناك زمن الأرجل الست على الأرض. مما سبق نجد أنه بالنسبة للسير الستاتيكي تكون أصغر قيمة $\beta = 0.5$ تحقق أعظم سرعة خطية. لكن لا يمكن تطبيقها عملياً بسبب أخطاء التموضع والمزامنة التي لا تجعل لحظة صعود الثلاثية الأولى وهبوط الثانية هو نفسه. وبالتالي يجب أن يوجد زمن صغير نسبياً تكون فيه الأرجل الست على الأرض.

3-1- الهدف

تصميم وتنفيذ روبوت سداسي الأرجل قادر على السير في كافة الإتجاهات والدوران في المكان. مع تغيير في هيئة الروبوت أثناء الحركة لتمكينه من النزول تحت عائق، تسلق العقبات، الصعود على مرتفعات، والسير في أرض وعرة نسبياً.

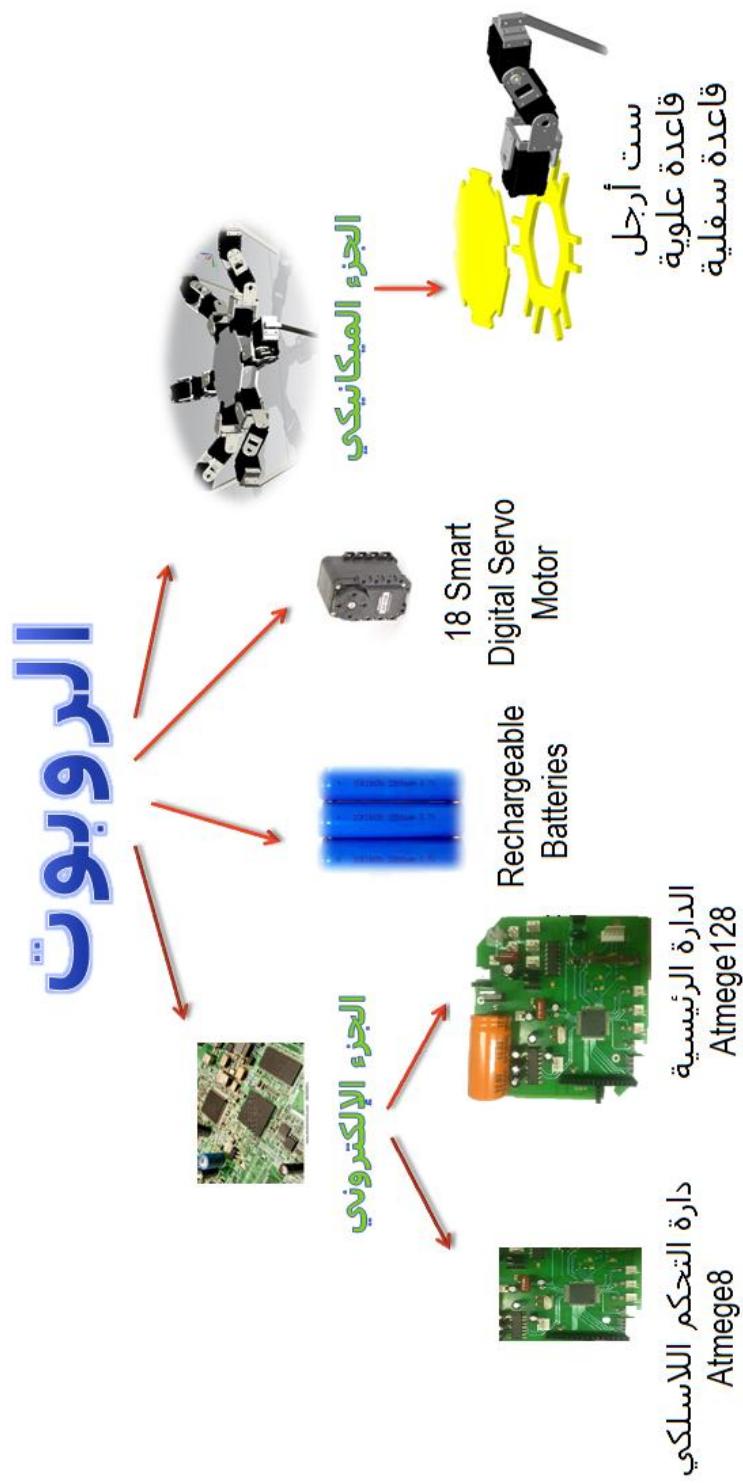
4-1- دفتر الشروط الوظيفية

تم وضع الشروط الوظيفية التالية:

- الوزن الأعظمي ($3Kg$).
- الأبعاد الأعظمية (ارتفاع: $30cm$ ، طول \times عرض: $(80 \times 80)cm$).
- سرعة أعظمية ($0.1m/s$).
- السير في أي اتجاه والدوران في المكان.
- دقة تموضع النهاية الطرفية للروبوت التسلسلي الخاص بكل رجل ($\pm 3mm$).

5-1- المخطط العام للنظام

يبين (الشكل 5) المخطط العام للنظام.



الشكل 5: يبين المخطط العام للنظام.

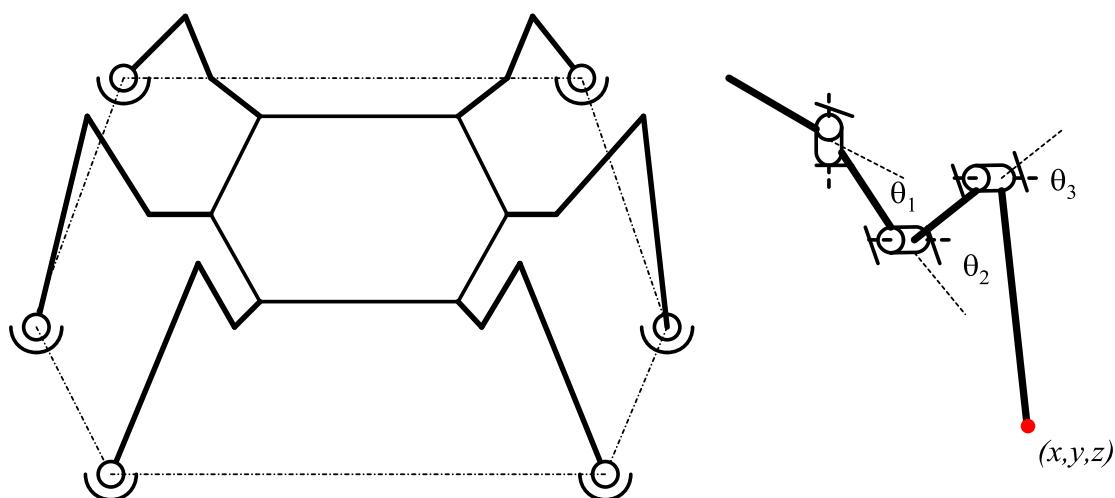
الفصل الثاني

2- النمذجة المذهبية

والمركبة

1-2. المخطط الحركي للنظام

ينقسم المخطط الحركي للنظام إلى مخططين (الشكل 6). عندما تكون الرجل في الهواء فهي عبارة عن روبوت تسلسلي بثلاث درجات حرية دورانية. عندما تكون الأرجل الستة على الأرض يصبح النظام عبارة عن روبوت تفريعي مكون من قاعدة علوية وست أفرع. يمكن نمذجة رابطة نهاية الرجل مع الأرض برابطة كروية.



الشكل 6: المخطط الحركي للنظام، حيث يظهر الشكل الأيمن المخطط الحركي لرجل واحدة. بينما يظهر الشكل الأيسر المخطط الحركي الكلي.

2-2. الحركية Mobility

إن عدد الأرجل التي على تماس مع الأرض يؤثر على حركية الروبوت كما أن عدد درجات الحرية للرجل الواحدة تؤثر أيضاً. يمتلك العنكبوت (12) درجة حرية للرجل الواحدة، أي أن الأمر يصبح معقداً إذا تم تطبيق هذا العدد الكبير. يجب تبسيط النظام و اختيار عدد الأرجل و عدد درجات الحرية اللازمة لمحاكاة حركة العنكبوت. عدد الأرجل اللازمة في نظامنا هو 6 وهو أدنى عدد ممكن لمحاكاة حركة العنكبوت حيث يحصل التوازن على ثلاثة أرجل خلال كل انتقال.

عندما تكون الرجل في الهواء يمكن نمذجتها بسلسلة مفتوحة مرتبطة بالجسم العلوي. خلال الحركة يجب على الرجل تحقيق التموضع (x, y, z) لذلك فإن أقل عدد ممكن من الروابط هو 3. أيضاً نجد أنه لتحقيق هذا التموضع يجب أن تكون هذه الروابط مفعولة. مما سبق نجد أننا نحتاج لست أرجل وكل رجل لها ثلاثة درجات حرية مفعولة أي 18 مفعول.

لحساب عدد درجات الحرية للجسم العلوي الناتجة نعوض في العلاقة التالية - وذلك باعتبار أنه عندما تكون الرجل على الأرض يكون التماس نقطياً (Tcheby chev) وبفرض عدم الإنزلاق فإن العلاقة بين الرجل والأرض تترجم برابطة كروية:-

$$\begin{aligned} DDL &= \lambda(NTC - j - 1) + NTL \\ &= 6(20 - 24 - 1) + 36 \end{aligned}$$

حيث:

NTC : عدد الأجسام الكلي في النظام = 20

NTL : عدد الروابط الكلي = 36

j : عدد المفاصل الكلي = 24

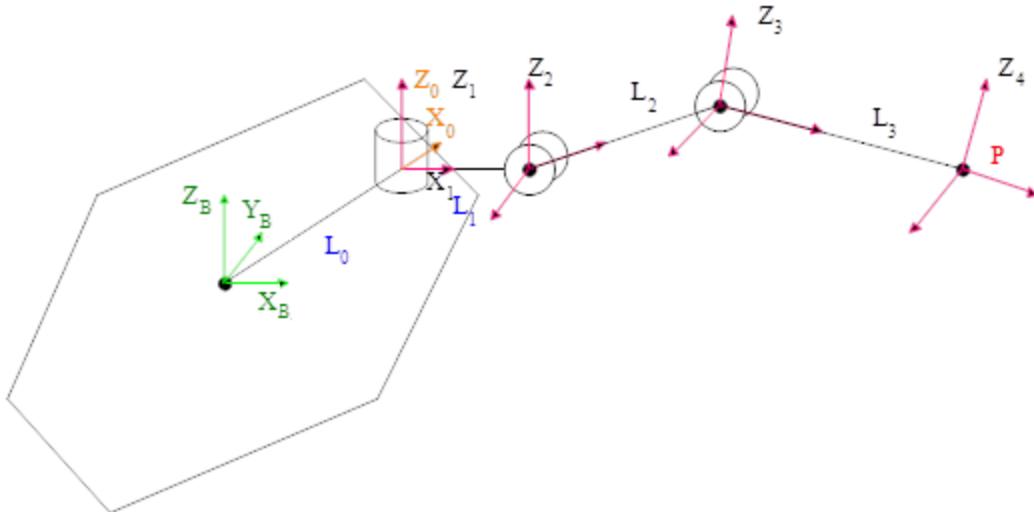
λ : في حالة السلسلة الفراغية يكون 6

بالتالي نجد أن عدد درجات الحرية الكلي للجسم العلوي 6 أي ثلاثة انسحابات وثلاث دورانات حول مركزه. يبقى لدينا معرفة عدد درجات الحرية للجسم في حال ثلاثة أرجل على الأرض، بالتعويض في العلاقة السابقة نجد أنه 6 درجات أيضاً:

$$\begin{aligned} DDL &= \lambda(NTC - j - 1) + NTL \\ &= 6(11 - 12 - 1) + 18 = 6 \end{aligned}$$

3-2- النموذج الهندسي المباشر لرجل واحدة (في الهواء) بالنسبة لجملة الجسم

يعطي هذا النموذج إحداثيات نهاية الرجل (x, y, z) (المتحولات العملياتية) بدالة موضع زوايا الروابط ($\{q = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}\}$) (المتحولات الرابطية). يبين الشكل 7 توضع الجمل بالنسبة لكل رابطة دورانية في رجل واحدة، وبالتالي يمكن إيجاد متحولات [04] Denavit-Hartenberg كما مبينة في الجدول (1).



الشكل 7: المخطط الحركي لرجل واحد متصلة بالجسم مع توضع الجمل.

حيث الجملة R_B الجملة المرتبطة بالجسم.

R_0 الجملة المرتبطة بمنطقة اتصال الرجل بالجسم وهي ثابتة بالنسبة للجسم.

R_1 الجملة المرتبطة بالرابطة الأولى الدورانية.

R_2 الجملة المرتبطة بالرابطة الثانية الدورانية.

R_3 الجملة المرتبطة بالرابطة الثالثة الدورانية.

R_4 الجملة المرتبطة بنهاية الجسم والتي تنتج بإجراء تحويل انسحاب L_3 انطلاقاً من الرابطة الثالثة.

الجدول 1: مصفوفة Denavit-Hartenberg لرجل واحد.

i	α_i	d_i	θ_i	r_i
1	0	0	θ_1	0
2	90°	L_1	θ_2	0
3	0	L_2	θ_3	0
4	0	L_3	0	0

من الجدول السابق نستطيع كتابة مصفوفات التحويل بين الجمل، لنتنصل في النهاية جداء هذه المصفوفات الذي يعطي مصفوفة التحويل ${}^B T_4$ (بين جملة نهاية الرجل والجملة المرتبطة بالجسم):

$${}_{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & d_i \\ C\alpha_i S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i & -r_i S\alpha_i \\ S\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i C\theta_i & C\alpha_i & r_i C\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^B T_0 = \begin{bmatrix} C\theta_0 & -S\theta_0 & 0 & L_0 C\theta_0 \\ S\theta_0 & C\theta_0 & 0 & L_0 S\theta_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0 T_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1 T_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2 T_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & L_2 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3 T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

حيث نستخدم الترميز التالي:

$$\begin{aligned} S\theta_1 &= \sin\theta_1 \\ C\theta_1 &= \cos\theta_1 \end{aligned}$$

جاء المصفوفات:

$${}^B T_4 = {}^B T_0 \cdot {}^0 T_1 \cdot {}^1 T_2 \cdot {}^2 T_3 \cdot {}^3 T_4$$

$${}^B T_4 = \begin{bmatrix} C_{01}C_{23} & -C_{01}S_{23} & 0 & L_0C_0 + C_{01}(L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}) \\ S_{01}C_{23} & S_{01}S_{23} & 0 & L_0S_0 + S_{01}(L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}) \\ S_{23} & C_{23} & 1 & L_2S_2 + L_3S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

من المصفوفة السابقة نستطيع إيجاد النموذج الهندسي المباشر لرجل واحدة بالنسبة لجملة

الجسم:

$$x = L_0C_0 + C_{01}(L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}) \quad (3.1)$$

$$y = L_0S_0 + S_{01}(L_1 + L_2C_2 + L_3C_{23}) \quad (3.2)$$

$$z = L_2S_2 + L_3S_{23} \quad (3.3)$$

4-2. النموذج الهندسي العكسي لرجل واحدة بالنسبة لجملة الجسم

هذا النموذج معاكس للنموذج السابقة أي يتم من خلاله إيجاد المتحوّلات الرباطية بدلاًلة العملياتية. إن البارامتران L_0, θ_0, θ_1 يعبران عن التحويل بين جملة الجسم والجملة المتصلة بالرجل من جهة القاعدة (وهذا التحويل ثابت). لإيجاد النموذج الهندسي العكسي نوجد المتحوّلات الرباطية بدلاًلة المتحوّلات العملياتية:

• إيجاد θ_1 :

من المعادلة الأولى والثانية (3.2, 3.1) نجد حلين:

$$\tan(\theta_0 + \theta_1) = \frac{y - L_0S_0}{x - L_0C_0}$$

$$\theta_1 = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{y - L_0S_0}{x - L_0C_0}\right) - \theta_0 \\ \pi + \tan^{-1}\left(\frac{y - L_0S_0}{x - L_0C_0}\right) - \theta_0 \end{cases}$$

• إيجاد θ_3 :

من المعادلة الأولى والثانية (3.1, 3.2)، نربع ونجمع ثم نجزر الطرفين:

$$\begin{aligned}(x - L_0 C_0)^2 &= C_{01}^2 (L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23})^2 \\(y - L_0 S_0)^2 &= S_{01}^2 (L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23})^2 \\\Rightarrow \sqrt{(x - L_0 C_0)^2 + (y - L_0 S_0)^2} - L_1 &= L_2 C_2 + L_3 C_{23}\end{aligned}$$

نربع المعادلة السابقة ونربع المعادلة 3.3 ثم نجمع:

$$\begin{aligned}(\sqrt{(x - L_0 C_0)^2 + (y - L_0 S_0)^2} - L_1)^2 + z^2 &= L_2^2 + L_3^2 + 2L_2 L_3 C_2 C_{23} + 2L_2 L_3 S_2 S_{23} \\&= L_2^2 + L_3^2 + 2L_2 L_3 C_3 \\\theta_3 = \pm \cos^{-1} \left\{ \frac{\left(\sqrt{(x - L_0 C_0)^2 + (y - L_0 S_0)^2} - L_1 \right)^2 + z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2 L_3} \right\}\end{aligned}$$

نجد حلین للزاویة θ_3 .

• إيجاد θ_2 :

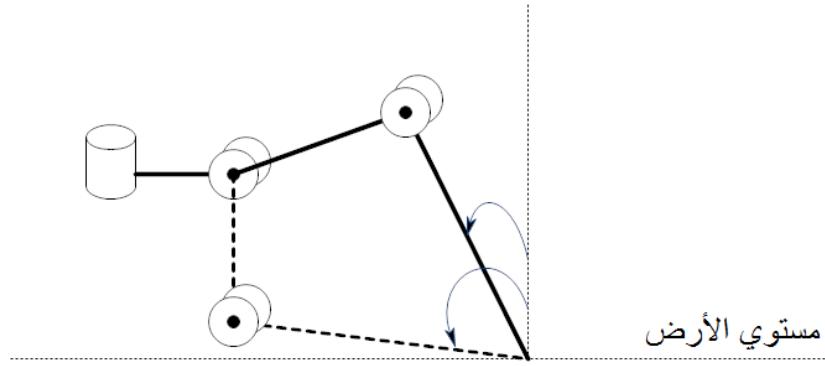
من المعادلة 3.2 و 3.3 نحصل على معادلتین بمجهولین (C_2, S_2) :

$$\begin{aligned}\frac{x - L_0 C_0}{C_{01}} - L_1 &= L_2 C_2 + L_3 C_{23}, & z &= L_2 S_2 + L_3 S_{23} \\\frac{x - L_0 C_0}{C_{01}} - L_1 &= L_2 C_2 + L_3 (C_2 C_3 - S_2 S_3), & z &= L_2 S_2 + L_3 (S_2 C_3 + C_2 S_3) \\\frac{x - L_0 C_0}{C_{01}} - L_1 &= C_2 (L_2 + L_3 C_3) - S_2 (L_3 S_3), & z &= C_2 (L_3 S_3) + S_2 (L_2 + L_3 C_3)\end{aligned}$$

بالحل المشترك للمعادلتین السابقتين نجد:

$$\begin{aligned}\frac{x - L_0 C_0}{C_{01}} - L_1 &= C_2 (L_2 + L_3 C_3) - S_2 (L_3 S_3), & z &= C_2 (L_3 S_3) + S_2 (L_2 + L_3 C_3) \\S_2 &= \frac{(L_2 + L_3 C_3)z - (L_3 S_3)(\frac{x - L_0 C_0}{C_{01}} - L_1)}{(L_3 S_3)^2 + (L_2 + L_3 C_3)^2} \\C_2 &= \frac{(L_3 S_3)z + (L_2 + L_3 C_3)(\frac{x - L_0 C_0}{C_{01}} - L_1)}{(L_3 S_3)^2 + (L_2 + L_3 C_3)^2} \\\theta_2 &= a \tan_2(S_2, C_2)\end{aligned}$$

نجد من أجل كل حل للزاویة θ_3 هناك حل وحيد للزاویة θ_2 . يبین (الشكل 8) كيفية اختيار الحلول.



الشكل 8: يبين الحلين الممكنين لنفس تموضع نهاية الرجل، نختار الحل الذي يعطي زاوية وقوف أكبر (الزاوية بين الرجل والمستقيم العمودي على الأرض)

5-2. النموذج الحركي العكسي لرجل واحدة

يعبر هذا النموذج عن السرعة الزاوية للروابط، أي $\dot{q}_i = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$ بدلالة السرعة الخطية لنقطة نهاية الرجل $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}^T$. يمكن الحصول عليه باستقاق معادلات الموضع (3.1, 3.2, 3.3) بالنسبة للزمن في الفقرة (3-2-):

$$\dot{x} = -\dot{\theta}_1 S_{01}(L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23}) + C_{01}(-\dot{\theta}_2 L_2 S_2 - (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) L_3 S_{23}) \quad (5.1)$$

$$\dot{y} = \dot{\theta}_1 C_{01}(L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23}) + S_{01}(-\dot{\theta}_2 L_2 S_2 - (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) L_3 S_{23}) \quad (5.2)$$

$$\dot{z} = \dot{\theta}_2 L_2 C_2 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) L_3 C_{23} \quad (5.3)$$

من المعادلة (5.3) نجد:

$$\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 = \frac{\dot{z} - \dot{\theta}_2 L_2 C_2}{L_3 C_{23}} \quad (5.4)$$

نعرض في (5.2) :

$$\begin{aligned} \dot{y} &= \dot{\theta}_1 C_{01}(L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23}) + S_{01}(-\dot{\theta}_2 L_2 S_2 - [\dot{z} - \dot{\theta}_2 L_2 C_2] \tan_{23}) \\ \Rightarrow \dot{\theta}_1 &= \frac{\dot{y} - S_{01}(-\dot{\theta}_2 L_2 S_2 - [\dot{z} - \dot{\theta}_2 L_2 C_2] \tan_{23})}{C_{01}(L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23})} \end{aligned} \quad (5)$$

نعرض (5.4) و(5.5) في المعادلة (5.1) لنجد:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -\left(\dot{y} + S_{01}(\dot{\theta}_2 L_2 S_2 + [\dot{z} - \dot{\theta}_2 L_2 C_2] \tan_{23})\right) \tan_{01} + C_{01}(-\dot{\theta}_2 L_2 S_2 - [\dot{z} - \dot{\theta}_2 L_2 C_2] \tan_{23}) \\ \Rightarrow \dot{\theta}_2 &= \frac{C_{01}(\dot{x} + \dot{y} \tan_{01}) + \dot{z} \tan_{23}}{L_2(C_2 \tan_{23} - S_2)} \quad (6) \end{aligned}$$

نعرض في المعادلة (5.4) لنجعل على $\dot{\theta}_2$ ، ثم نعرض في المعادلة (5.5) لنجعل على

$$\dot{\theta}_1$$

6-2- النموذج الهندسي العكسي الكلي

نعرف مابلي كما مبين في (الشكل 9):

- الجملة $R_B(O_B, X_B, Y_B, Z_B)$ الجملة المرتبطة الجسم (Body) وتقع في مركزه.
- الجملة $R_R(O_R, X_R, Y_R, Z_R)$ الجملة المرجعية (Reference) تقع على مستوى الأرض.
- الجملة $R_{Li}(O_L, X_L, Y_L, Z_L)$ الجملة المرتبطة بنهاية كل رجل.
- الجملة $R_{0i}(O_0, X_0, Y_0, Z_0)$ الجملة المرتبطة ب نقطة اتصال كل رجل مع الجسم.

لتوصيف إحداثيات مركز جملة الجسم بالنسبة للجملة المرجعية نضع الشعاع التالي:
 $P = [P_x, P_y, P_z]^T$. بالنسبة لتوصيف الوضع الزاوي لجملة الجسم بالنسبة للجملة المرجعية فنعتمد على الزوايا $Roll-Pitch-Yaw$ التي تعرف الدوران بين جملتين:

دوران حول المحور Z_R بزاوية α ، وتكون مصفوفة الدوران:

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

دوران حول المحور Y_R بزاوية β ، وتكون مصفوفة الدوران:

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

دوران حول المحور X_R بزاوية γ ، وتكون مصفوفة الدوران:

$$R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

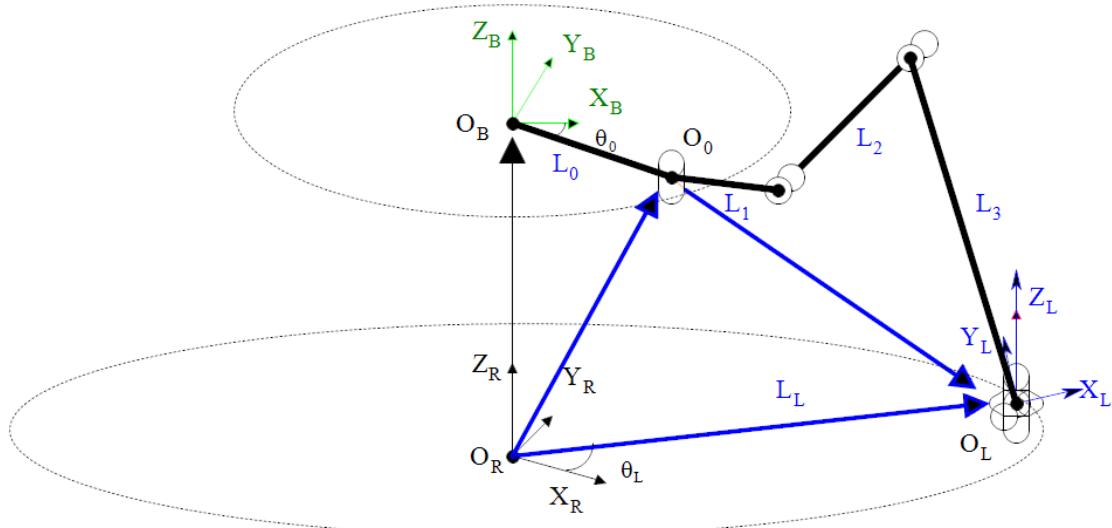
ف تكون مصفوفة الدوران التي تعبر عن الوضع الزاوي لجملة الجسم بالنسبة لجملة القاعدة:

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}$$

بالتالي نوجد مصفوفة التحويل:

$${}^R T_B = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & P_x \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & P_y \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



الشكل 9: يبين المخطط الحركي لرجل واحد على تماس الأرض، ويبيّن أيضًا توضع الجمل المعرفة سابقاً.

نعرف مصفوفات التحويل بين الجمل المرتبطة بنهاية الأرجل والجملة المرجعية (دوران

بزاوية θ_{L_i} وانسحاب (L_{L_i})

$${}^R T_{Li} = \begin{bmatrix} C_{Li} & -S_{Li} & 0 & L_{Li}C_{Li} \\ S_{Li} & C_{Li} & 0 & L_{Li}S_{Li} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

حيث i يرمز إلى الرجل. وتعطى إحداثيات نقطة نهاية الرجل (O_L) بالنسبة للجملة المرجعية:

$$\begin{aligned} X_{Li} &= L_{Li}C_{Li} \\ Y_{Li} &= L_{Li}S_{Li} \\ Z_{Li} &= 0 \end{aligned}$$

بنفس الطريقة بالنسبة للجملة R_{0i} المرتبطة بنقطة اتصال الرجل بالجسم O_{0i} بالنسبة لجملة الجسم كما يلي:

$${}^B T_{0i} = \begin{bmatrix} C_{0i} & -S_{0i} & 0 & L_{0i}C_{0i} \\ S_{0i} & C_{0i} & 0 & L_{0i}S_{0i} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} X'_{0i} &= L_{0i}C_{0i} \\ Y'_{0i} &= L_{0i}S_{0i} \\ Z'_{0i} &= 0 \end{aligned}$$

حيث ('') تعني أن الشعاع أو الإحداثيات مكتوبة في جملة الجسم R_B .

نريد حساب النموذج العكسي أي حساب المتحولات الرابطية $q_i = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ لكل رجل بدالة المتحولات العملياتية $X = [P_x, P_y, P_z, \alpha, \beta, \gamma]^T$. سنقوم بإيجاد إحداثيات النقطة O_{Li} مكتوبة في الجملة R_{0i} وبالتالي نستطيع الاستفادة من النموذج العكسي للرجل في الهواء لإيجاد المتحولات الرابطية. لتحقيق ذلك يجب إيجاد الشعاع $r_{O_{0i}O_{Li}}$ ثم نكتبه في الجملة R_{0i} .

من المثلث (O_R, O_0, O_L):

$$r_{O_R O_{Li}} - r_{O_R O_{0i}} = r_{O_{0i} O_{Li}}$$

- نقوم أولاً بإيجاد إحداثيات نقاط اتصال الأرجل بالجسم O_{0i} بالنسبة للجملة المرجعية:

$$\dot{r}_{O_R O_{0i}} = {}^R T_B \cdot \dot{r}'_{O_B O_{0i}}$$

بما أن ${}^R T_B$ معلومة نكتب ما يلي:

$$\begin{aligned} X'_{0i} &= L_{0i} C_{0i} \\ Y'_{0i} &= L_{0i} S_{0i} \\ Z'_{0i} &= 0 \end{aligned}$$

بالتالي:

$$\begin{aligned} \dot{r}_{O_R O_{0i}} &= {}^R T_B \cdot \dot{r}'_{O_R O_{0i}} \\ \begin{bmatrix} X_{0i} \\ Y_{0i} \\ Z_{0i} \\ 1 \end{bmatrix} &= {}^R T_B \cdot \begin{bmatrix} X'_{0i} \\ Y'_{0i} \\ Z'_{0i} \\ 1 \end{bmatrix} \\ X_{0i} &= P_X + L_{0i} [C_{0i} C_\alpha C_\beta + S_{0i} (C_\alpha S_\beta S_\gamma - S_\alpha C_\gamma)] \\ Y_{0i} &= P_Y + L_{0i} [C_{0i} S_\alpha C_\beta + S_{0i} (S_\alpha S_\beta S_\gamma + C_\alpha C_\gamma)] \\ Z_{0i} &= P_Z - L_{0i} [C_{0i} S_\beta - S_{0i} C_\beta S_\gamma] \end{aligned}$$

• يوجد مركبات الشعاع $: r_{O_{0i} O_{Li}}$

$$\begin{aligned} r_{O_{0i} O_{Li}} &= r_{O_R O_{Li}} - r_{O_R O_{0i}} \\ &= \begin{bmatrix} X_{Li} - X_{0i} \\ Y_{Li} - Y_{0i} \\ Z_{Li} - Z_{0i} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

• بعد إيجاد مركبات الشعاع $r_{O_{0i} O_{Li}}$ يمكن الآن استخدام النموذج الهندسي العكسي للرجل في الهواء (بحذف المتحول L_0).

7-2. النموذج الحركي العكسي الكلي

يعبر هذا النموذج عن السرعة الزاوية للروابط $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3$ لكافة الأرجل بدلالة شعاع السرعة للمتحولات العملياتية $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}$. يمكن الحصول عليه باشتقاق الشعاع $r_{O_{0i} O_{Li}}$ بالنسبة لزمن المبين في الفقرة السابقة.

$$\dot{r}_{O_{0i} O_{Li}} = - \begin{bmatrix} \dot{X}_{0i} \\ \dot{Y}_{0i} \\ \dot{Z}_{0i} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}\dot{X}_{0i} &= \dot{P}_x + L_{0i} \left[\dot{\alpha} (-S_\alpha C_\beta C_{0i} - S_{0i} (S_\alpha S_\beta S_\gamma + C_\alpha C_\gamma)) + \dot{\beta} C_\alpha (-C_{0i} S_\beta + S_{0i} C_\beta S_\gamma) + \dot{\gamma} S_{0i} (C_\alpha S_\beta C_\gamma + S_\alpha S_\gamma) \right] \\ \dot{Y}_{0i} &= \dot{P}_y + L_{0i} \left[\dot{\alpha} (C_{0i} C_\alpha C_\beta + S_{0i} (C_\alpha S_\beta S_\gamma - S_\alpha C_\gamma)) + \dot{\beta} S_\alpha (-C_{0i} S_\beta + S_{0i} C_\beta S_\gamma) + \dot{\gamma} S_{0i} (S_\alpha S_\beta C_\gamma - C_\alpha S_\gamma) \right] \\ \dot{Z}_{0i} &= \dot{P}_z - L_{0i} \left[\dot{\beta} (C_{0i} C_\beta - S_{0i} S_\beta S_\gamma) + \dot{\gamma} S_{0i} C_\beta C_\gamma \right]\end{aligned}$$

بعد ذلك نعرض في النموذج الحركي العكسي لرجل واحدة ثم نوجد المطلوب.

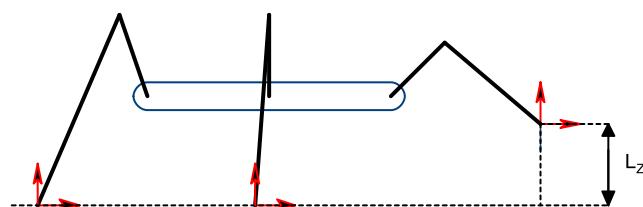
8-2- النموذج الهندسي العكسي المعمم

يختلف هذا النموذج عن النموذج السابق في تعريف نقطة نهاية الرجل (O_L) بالنسبة للجملة المرجعية التي كانت معرفة على الشكل التالي (جميع نقاط نهاية الأرجل على نفس المستوى- الأرض-):

$$\begin{aligned}X_{Li} &= L_{Li} C_{Li} \\ Y_{Li} &= L_{Li} S_{Li} \\ Z_{Li} &= 0\end{aligned}$$

نضيف هنا أنه من الممكن أن تكون نقطة نهاية الرجل متوضعة في مستوى مختلف عن المستوى الأرضي كما مبين في (الشكل 10)، حيث تحدث هذه الحالة عند السير على أرض غير مستوية. وبالتالي يصبح التحويل:

$$\begin{aligned}X_{Li} &= L_{Li} C_{Li} \\ Y_{Li} &= L_{Li} S_{Li} \\ Z_{Li} &= L_{zi}\end{aligned}$$



الشكل 10: نقطة نهاية الرجل متوضعة في مستوى غير مستوى الأرض، مما يعطي عمومية للنموذج.

2-9-2. حساب العزم المطلوب من المفعلات

تعطى علاقة العزم (في حالة السكون) اللازم من المحركات لتطبيق قوة ما على طرف الأداة في حالة السكون:

$$\Gamma = J^T F$$

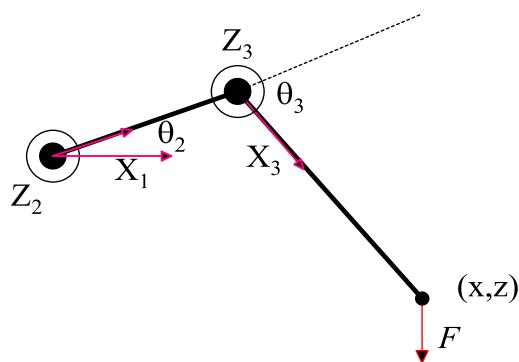
حيث:

$$F = [F_x, F_y, F_z]^T$$

$$\Gamma = \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3^T$$

J : المصفوفة اليعقوبية.

لتبسيط الحساب نعتبر الرجل سوف تطبق قوة للأسفل، ونفرض الحالة الأسوأ أي أن تكون ثلاثة أرجل على الأرض (التي يكون فيها أقل عدد من الأرجل على الأرض وبما يكفي للتوازن). وبالتالي، على كل رجل من الأرجل الثلاث التي تكون على تماس مع الأرض أن تطبق قوة تقابل وزن الروبوت التقديرية مقسماً على ثلاثة (كما في الشكل 11).



الشكل 11: القوة F التي يجب على المحركين الأول والثاني تطبيقها من أجل رفع الجسم للأعلى (أي التغلب على الوزن).

ندرس الرجل في المستوى (X, Z) ونوجد إحداثيات طرف الرجل:

$$x = L_2 C_2 + L_3 C_{23}$$

$$z = L_2 S_2 + L_3 S_{23}$$

بالناتي المصفوفة اليعقوبية:

$$J = \begin{bmatrix} -L_2 S_2 - L_3 S_{23} & -L_3 S_{23} \\ L_2 C_2 + L_3 C_{23} & L_3 C_{23} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_2 S_2 - L_3 S_{23} & L_2 C_2 + L_3 C_{23} \\ -L_3 S_{23} & L_3 C_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F(L_2 C_2 + L_3 C_{23}) \\ -F L_3 C_{23} \end{bmatrix}$$

نفرض وزن أعظمي للروبوت وهو (2kg) (وزن تم افتراضه بناءً على تصميم مبدئي)،
نفرض وضعية الرجل كالتالي، كما نفرض أطوال روابط مبدئية:

$$F = mg / 3 = 2 * 9.8 / 3 = 6.5N$$

$$\theta_2 = 45^\circ$$

$$\theta_3 = -90^\circ$$

$$L_2 = 0.08m, L_3 = 0.12m$$

بالتالي العزم статический الموافق لهذه القوة في الوضعية المذكورة هو:

$$\begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.92 \\ -0.55 \end{bmatrix} N.m$$

تم الحساب السابق في حالة السكون. سنقوم بالحساب الديناميكي البسيط باعتبار الجسم
سيرتفع للأعلى مسافة x_1 خلال زمن t_1 . نقوم بتطبيق المبدأ الأساسي في التحرير فتكون القوى
اللازمة للرفع:

$$F = \frac{m}{3} \ddot{x} + F_e = \frac{m}{3} (\ddot{x} + g)$$

حيث F_e رد قوة الثقالة.

لحساب التسارع السابق (ثابت ونرمز له a)، نقوم بكتابة المعادلات الحركية عند الإنطلاق
من السكون إلى السرعة v_1 خلال زمن t_1 :

$$\left. \begin{array}{l} x(t) = \frac{a}{2} t^2 \\ v(t) = at \end{array} \right\} t = t_1 \Rightarrow a = 2 \frac{x_1}{t_1^2}$$

نفرض المسافة المقطوعة $x_1 = 0.1m$ خلال زمن $t_1 = 0.5s$ فيكون التسارع $a = 0.8m/s^2$
بالتالي تكون القوة اللازمة تطبيقها:

$$F = \frac{m}{3} (a + g) = \frac{2}{3} (0.8 + 9.8) \approx 7N$$

بالتالي العزم الستاتيكي الموافق لهذه القوة في الوضعية المذكورة هو:

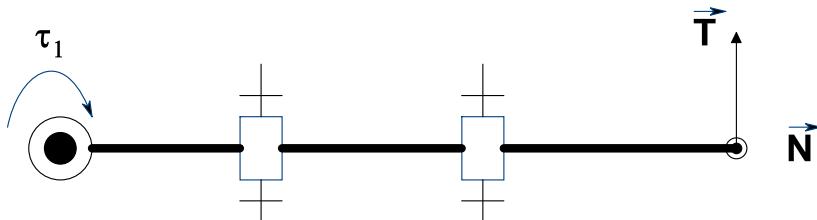
$$\begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.99 \\ -0.59 \end{bmatrix} N.m$$

تم حساب العزم المطبق على المحركين الثاني والثالث، أما بالنسبة للمحرك الأول سيتم حسابه كما يلي. كما مبين في (الشكل 12) على المحرك الأول أن يتغلب على العزم الناتج من قوى الاحتكاك مع الأرض. يتشكل هذا العزم من جداء البعد بين المحرك ونقطة التلامس مع الأرض وقوى الاحتكاك المماسية. تعطى علاقة قوة الاحتكاك المماسية في حالة السكون كما يلي:

$$T = f \cdot N = f \cdot m \cdot g$$

$$\tau_1 = LT = L \cdot f \cdot m \cdot g = 0.3 \times 0.5 \times \frac{2}{3} \times 9.8 = 0.98 N.m$$

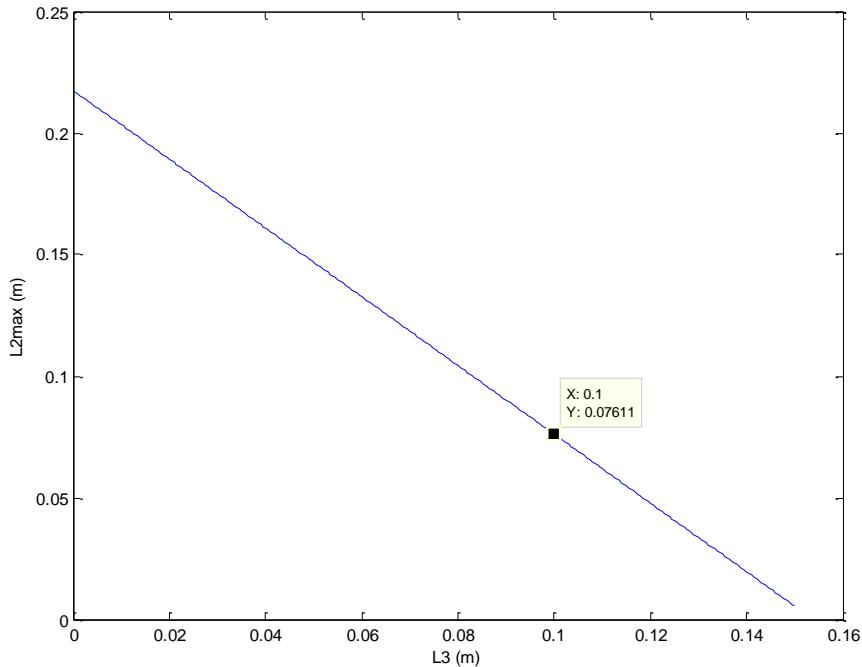
حيث L هو البعد الأعظمي بين محور المحرك الأول ونقطة التلامس مع الأرض في أسوأ حالة. f معامل الاحتكاك السكوني 0.5 بين مادة المطاط والإسفلت (حيث يتم تغطيس نهاية الأرجل بمادة مطاطية لزيادة الاحتكاك ونفرض السير على الإسفلت كأسوأ حالة للاحتكاك).



الشكل 12: العزم المطبق على المحرك الأول.

نلاحظ مما سبق أن العزم المطبق على الرابطة الثانية هو الأكبر وبالتالي اختيار المحرك بناءً على هذه الرابطة. من أجل معامل أمان 1.5 لعزم المحرك، اختيار المحرك AX-12A ذو العزم 1.5N.m، سنتحدث لاحقاً عن هذا المحرك.

من أجل اختيار البعدين L_3, L_2, L_1 ، فإن كلما كان هذين البعدين أكثر طولاً نحصل على فضاء عمل أكبر. لكن هذين الطولين محدودين بالعزم المقتمة من قبل المحركات كما تبين سابقاً. لإيجاد أكبر طول ممكن للطول L_2 يمكننا إيجاد علاقة بين L_2 و L_3 بحيث يكون معامل الأمان للمفعول 2 مساوياً 1.5 (باعتبار العزم المطلوب من المحرك 2 أكبر من المحرك 3). يمكن اختيار الأطول عن طريق المنحني المبين في (الشكل 13).



الشكل 13 منحني ($L_2max(L_3)$) من أجل معامل أمان $s=1.5$ للمفعول 2 يمكن اختيار $L_3=0.1m, L_2=0.076m$ مثلاً.

10-2- فضاء العمل

تكمّن أهمية دراسة فضاء العمل في معرفة تأثير الأبعاد الهندسية على هذا الفضاء وبالتالي تغييرها للحصول على أكبر فضاء (ضمن حدود عزم المحركات). نريد أيضاً دراسة تأثير الأبعاد الهندسية على الخطوة والحصول على أكبر خطوة ممكنة (الخطوة: أكبر انتزاع ممكن ضمن المستوى الموازي للأرض ضمن حدود فضاء العمل). سنتكلّم أولاً عن القيود الميكانيكية التي تقييد فضاء العمل.

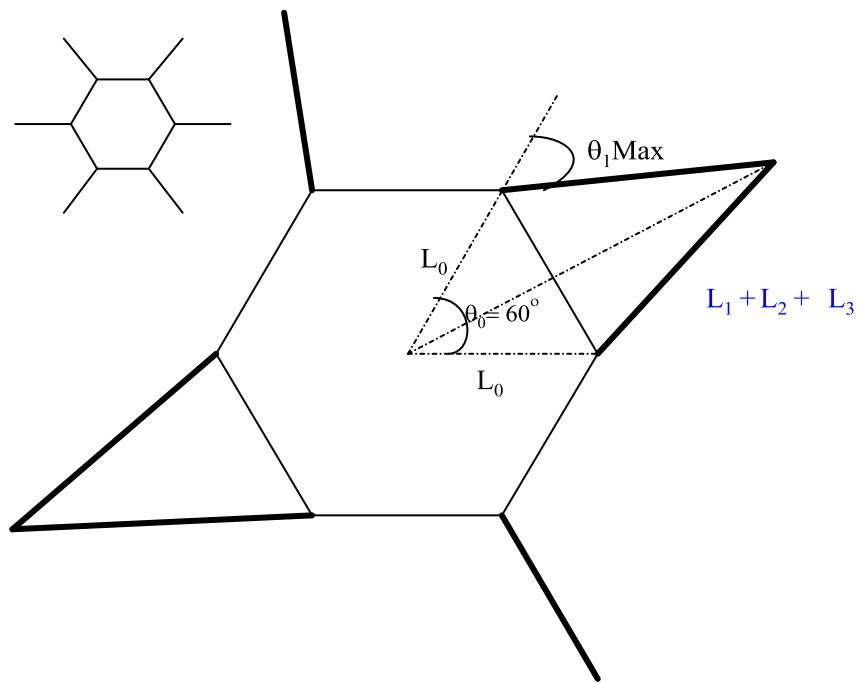
10-2-1. القيود الميكانيكية

تنتج هذه القيود من التصميم الميكانيكي بشكل أساسى وبحسب مجال عمل المفولات. إن مجال عمل المحركات المختارة هو $[150, 150^0]$. لكن القيود الناتجة من التصميم المبدئي تحدّ هذا المجال إلى $[103, 103^0]$ بالنسبة لكل محرك. لكن بعد إنتهاء التصميم الميكانيكي وجدنا أن مجال الرابطة الأولى والثانية الميكانيكي هو $[103, 103^0]$ ، أما بالنسبة للرابطة الثالثة نجد $[-175, 103^0]$.

بالنسبة لقيود الرابطة الأولى θ_1 فكما في (الشكل 14) من أجل نمط الحركة (3 by 3) نجد أنه أسوأ حالة لمجال الرابطة هو عندما تكون الأرجل السبعة على الأرض. وبالتالي تكون أقرب

مما يمكِن لبعضها ويكون الطول L_{L_i} أقصَم ما يمكن عند أخفض ارتفاع. وبالتالي يكون القيد الميكانيكي ناتجاً عن تصادم الأرجل ببعضها. يمكن حساب مجال الرابطة الأولى كما يلي:

$$\theta_{1Limit} = \pm \left(\frac{\pi}{6} + \arcsin\left(\frac{L_0 \sin(\frac{\pi}{8})}{L_1 + L_2 + L_3}\right) \right) \quad (10.1)$$



الشكل 14: يوضح القيد الميكانيكي على الرابطة الأولى الناتج عن تصادم الأرجل أثناء السير.

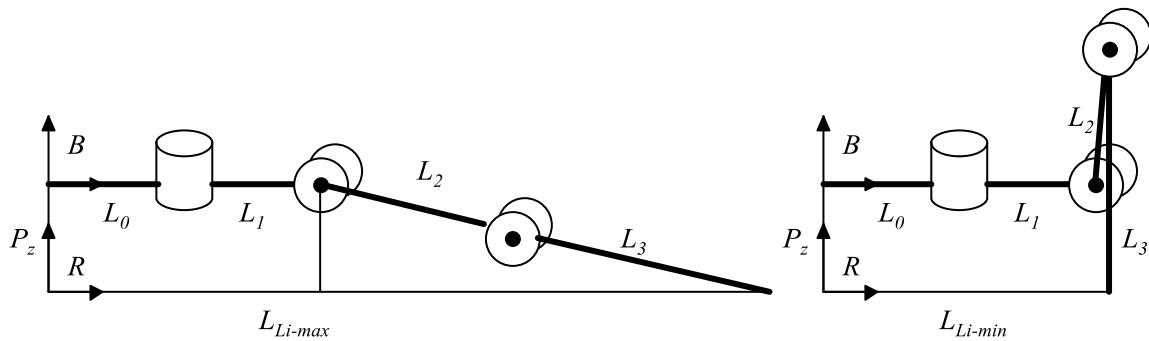
10-2. تأثير الأبعاد الهندسية

بالنسبة للبعد L_{L_i} (بعد نقطة تلامس نهاية الرجل مع الأرض عن الجملة المرجعية R_R) فإنه يتعلق بالوضعية الابتدائية للوقوف وذلك عند كل ارتفاع. يتم حساب هذا الطول بحيث نحصل على أكبر خطوة. نلاحظ من (الشكل 15) كيف يكون الطول L_{L_i} أصغر ممكِن وأكبر ممكِن. في كلا الوضعيتين لا يستطيع الروبوت الحركة ضمن المستوى الموازي للأرض لذلك نجد أن يجب أن يكون البعد L_{L_i} في منتصف الوضعيتين السابقتين ويمكن حسابه بالعلاقة التالية:

$$L_{Li-min} = L_0 + L_1$$

$$L_{Li-max} = L_0 + L_1 + \sqrt{(L_2 + L_3)^2 - P_z^2}$$

$$L_{Li} = \frac{L_{Li-min} + L_{Li-max}}{2} = L_0 + L_1 + \frac{\sqrt{(L_2 + L_3)^2 - P_z^2}}{2}$$



الشكل 15: حالة L_{Li-min} إلى اليمين و L_{Li-max} إلى اليسار في الحالتين لا يستطيع الروبوت الحركة.

الأبعاد L_2, L_3 يتم اختيارها أكبر ما يمكن لزيادة خطوة السير وزيادة فضاء العمل بشكل عام، ولكن ضمن حدود عزم المحركات (حيث وجدنا سابقاً أن زيادة هذه الأبعاد تزيد العزم اللازム تطبيقه من المحركات وتم اختيار هذه الأطوال ضمن معامل أمان 1.5). أما بالنسبة للطول L_1 فمن العلاقة (10.1) في الفقرة (10-1-2) نجد أنه يجب أن يكون أصغر ما يمكن لكي تكون θ_{IMax} أكبر ما يمكن.

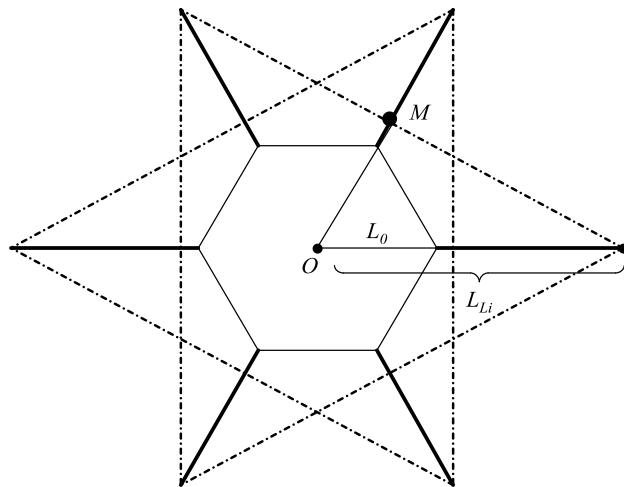
البعد L_0 (بعد نقطة اتصال الرجل مع الجسم عن مركز جملة الجسم R_B) سيتم اختياره بالاعتماد على خطوة السير لاحقاً.

3-10-2. خطوة السير

تعرف خطوة السير بالمسافة الأعظمية التي يمكن للجسم العلوي الإنفصال عنها نحو اتجاه السير، وذلك ضمن حدود منطقة التوازن وعند كل ارتفاع للجسم P_z . يحد الخطوة ميكانيكاً فضاء العمل والأبعاد الهندسية ونرحب بالحصول على أكبر خطوة ممكنة مستقرة.

من أجل نمط الحركة (3x3) يجب أن يكون مركز العطالة O ضمن المثلث المتساوي الأضلاع المشكل من نقاط التقاء الأرجل الثلاث مع الأرض، وذلك من أجل كل ثلاثة كما موضح في (الشكل 16). نجد أن نقاط المثلثين يمثل منطقة التوازن ويمكن حساب أقل مسافة ممكنة وهي OM كما يلي:

$$\begin{aligned} OM &= \frac{L_{Li}}{2} \\ &= \frac{L_0 + L_1 + \sqrt{P_z^2 - (L_2 + L_3)^2}}{4} \end{aligned}$$



الشكل 16: يوضح منطقة التوازن المشكلة من تقاطع المثلثين المتسلقي الأضلاع، المسافة الأعظمية للخطوة OM هي

تتعلق المسافة OM بأبعاد الرجل كما توضح العلاقة السابقة وبأبعاد القاعدة والارتفاع الإبتدائي للجسم عن الأرض. لكن بالنسبة للحدود الميكانيكية للخطوة فإنها أيضاً تتعلق بالأبعاد الهندسية. عرضنا سابقاً كيفية اختيار الأبعاد L_1, L_2, L_3 ويبقى اختيار البعد L_0 الذي يؤثر أيضاً على خطوة السير وستتم مناقشته.

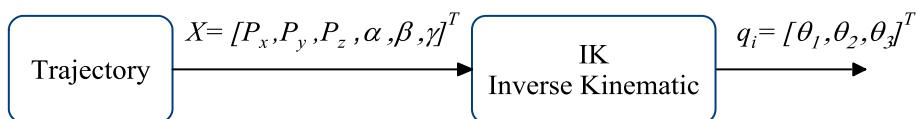
عندما يكون L_0 كبيراً نسبياً فإن حدود الخطوة (ميكانيكياً) تصبح عندما تكون $\theta_3 = 0$ (حالة شادة) أي الزراع L_2 و L_3 على استقامة واحدة وتكون الخطوة ثابتة مهما كان L_0 كبيراً. بتصغير L_0 تصبح حدود الخطوة متعلقة بالقيد الميكانيكي $\theta_{I-Limit}$ المبين في العلاقة (10.1) (وذلك في حالة نمط الحركة 3 by 3)، وتتقross الخطوة كلما نقص L_0 عن الحد الذي يحقق الشرط السابق. وبالتالي هناك طول معين ل L_0 تصبح فيه حدود الخطوة متعلقة بالشروطين السابقين معاً. بما أننا نرغب بأكبر خطوة ممكنة فإننا نختار الطول الذي يحقق هذين الشرطين.

يجب التأكد من أن أكبر خطوة ضمن فضاء العمل أصغر من البعد OM بمعامل أمان 1.2 كي تكون حركة السير مستقرة. بعد تثبيت الأبعاد يمكن باستخدام Matlab حساب الخطوة الأعظمية للسير وهي $0.09cm$ من أجل الأبعاد $[L_0=0.1m, L_1=0.053m, L_2=0.068m, L_3=0.1m]$

وذلك عند أخفض ارتفاع بحسب القيود الميكانيكية $P_z = 0.034m$. هذه الخطوة أصغر من البعد $OM = 0.15m$ من أجل الأبعاد السابقة، وبالتالي نجد أن خطوة السير مستقرة.

11-2- توليد المسارات

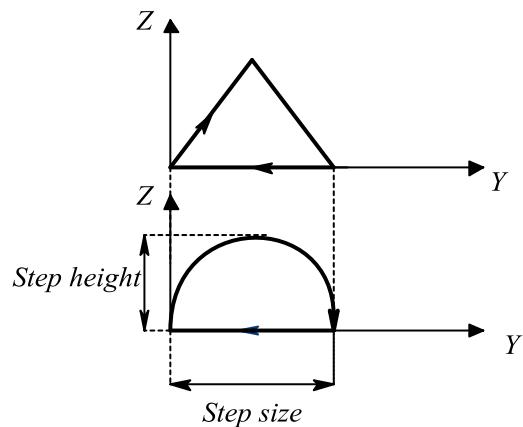
يعرف المسار بأنه مجموعة النقاط التي يسلكها الجسم الطرفي. كما في (الشكل 17) يتم تطبيق مسار معين على المتحوولات العملية (الجسم) X ، ثم حساب المتحوولات الرابطية q (المفعلات) في كل نقطة من المسار وذلك باستخدام النموذج الهندسي العكسي.



الشكل 17: كيفية تطبيق المسار وحساب المتحوولات الرابطية لكل رجل i .

11-1. السير باستخدام النمط الثلاثي (3x3)

بالنسبة لحركة السير للأمام باستخدام النمط الثلاثي، فكما تحدثنا سابقاً في الفقرة (01-2-1) يتم رفع الثلاثية (الأولى) المتأرجحة في الهواء وتقمنها للأمام، وعلى الثلاثية الثانية (ثلاثية الاستناد) أن تسحب الجسم للأمام. كما يوضح (الشكل 18)، يكون أبسط مسار لنقطة نهاية الرجل عبارة عن خطين مستقيمين. يتميز المسار بمعاملين هما الإرتفاع الأعظمي للرجل في الهواء وطول الخطوة. يمكن تطبيق مسار آخر كما في الشكل نفسه وهو على شكل قطع مكافئ. يتمأخذ عدة نقاط من المسار نفسه ثم حساب النموذج العكسي عند كل نقطة وبالتالي الحصول على المتحوولات الرابطية اللازمة لاتباع هذا المسار.

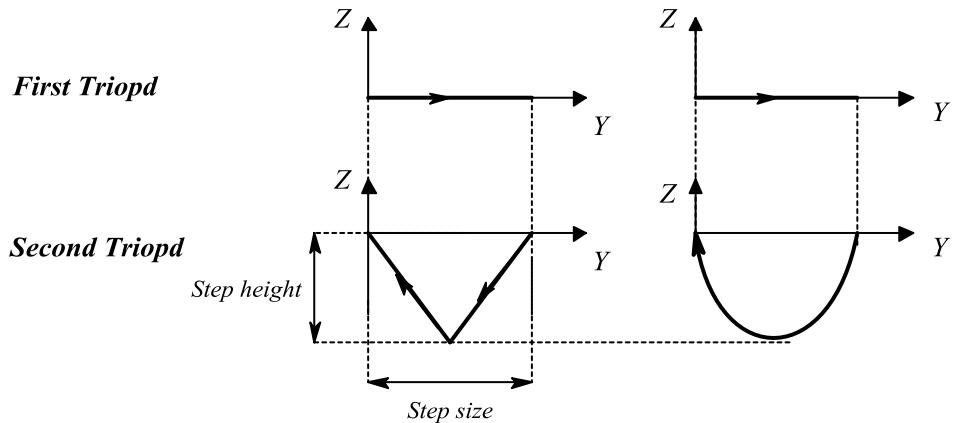


الشكل 18: شكل يبين المسار الذي يجب أن تسلكه نهاية الرجل خلال خطوة من أجل ثلاثة معينة. المسار العلوي هو مسار بسيط على شكل قطع مستقيمة، أما المسار السفلي فهو عبارة عن قطع مكافئ لكنه مفيد في حالة وجود أرض وعرة.

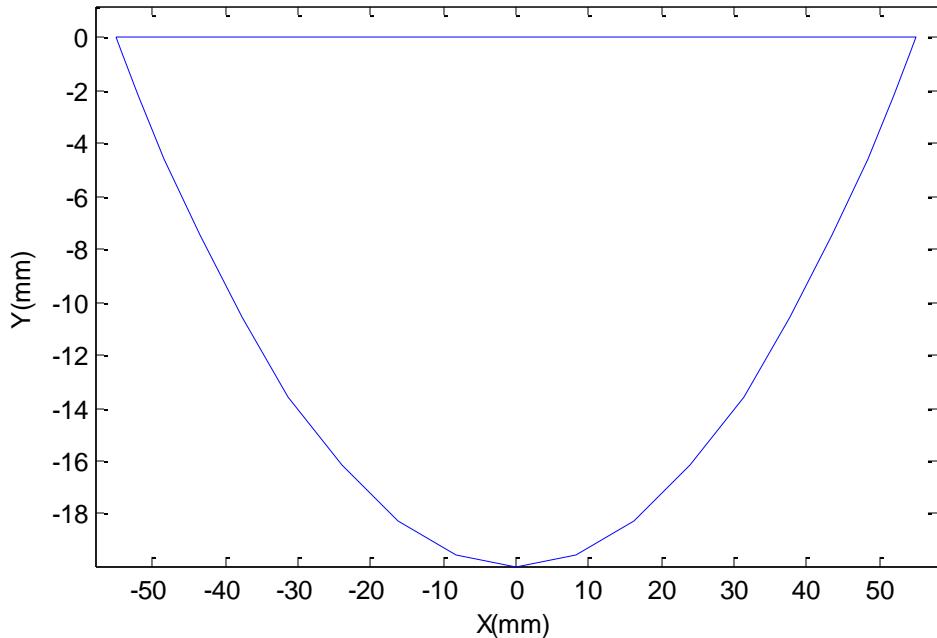
لتسهيل حساب الإحداثيات الرابطية سنستخدم نموذج واحد وهو النموذج الهندسي العكسي الكلي وليس نموذج الرجل الواحدة. بالنسبة لحركة ثلاثة واحدة (ثلاثية الاستناد)، يتم تطبيق مسار مستقيم على مركز الجسم العلوي ثم حساب المتحولات الرابطية. في نفس الوقت وبالنسبة للثلاثية المتأرجحة يتم تطبيق المسار المبين في ((الشكل 19) في الأسفل)، ثم حساب المتحولات الرابطية.

نلاحظ من الشكل نفسه أن مسار الثلاثة المتأرجحة عبارة عن نزول ثم صعود للجسم. لكن بما أن الجسم محمول من قبل ثلاثة الاستناد، فستقوم الثلاثية المتأرجحة بالإرتفاع نحو الأعلى ثم الهبوط إلى الأرض.

نقوم بعكس الحركة السابقة للحصول على مسارات المتحولات الرابطية للثلاثيتين لتكرار حركة السير للأمام كما مبين في (الشكل 20). يمكن تطوير المسار السابق للسير في أي اتجاه أيضاً.



الشكل 19: يبين المسار البسيط (اليسار) والقطعي (اليمين) لمركز الجسم العلوي. المسار في الأعلى لثلاثية الاستناد، بينما المسار في الأسفل هو مسار وهي للحصول على المتحولات الرابطية للثلاثية المتأرجحة وذلك لتسهيل الحسابات.



الشكل 20- يبين مسار الحركة لثلاثية واحدة المطبق على النموذج الهندسي العكسي الكلي (ارتفاع الخطوة $h=20mm$ ، طول الخطوة $110mm$).

بالنسبة لمسار الجسم بالنسبة للزمن والسرعة، يجب أن ينطلق بسرعة معدومة ويصل لنهاية المسار بسرعة معدومة أيضاً، ذلك لتجنب صرف الطاقة السريع من قبل المحركات ولتجنب الانزلاق أيضاً. لتحقيق الشروط السابقة يجب أن يكون المسار من الدرجة الثانية بالنسبة للسرعة وبالتالي من الدرجة الثالثة بالنسبة للموضع. تبين المعادلة التالية من الدرجة الثالثة الموضع بالنسبة للزمن، ولها أربع ثوابت وبالتالي تحتاج لأربع معاليم (موقع البداية i_0 ، موقع النهاية i_f ، سرعة البداية i_0 وسرعة النهاية i_f):

$$u(t) = at^3 + bt^2 + ct + d$$

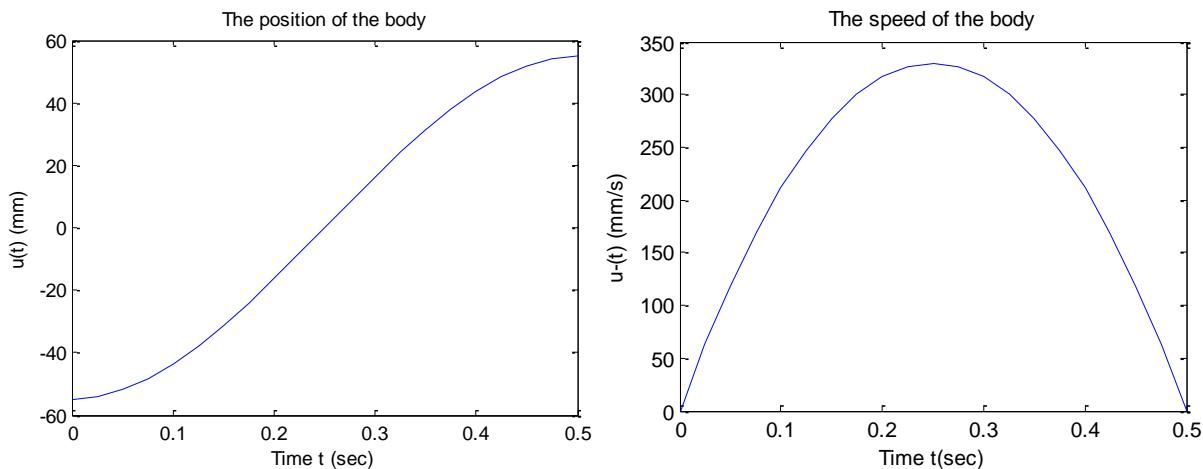
$$u(0) = u_i$$

$$u(T) = u_f$$

$$\dot{u}(0) = \dot{u}_i$$

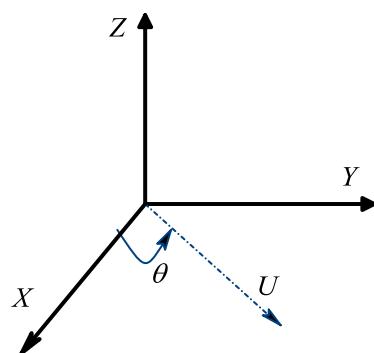
$$\dot{u}(T) = \dot{u}_f$$

حيث T هو دور الحركة، وبالتالي نستطيع حساب ثوابت المعادلة a, b, c, d . يبين (الشكل 21) تغير الموضع والسرعة بالنسبة للزمن:



الشكل 21- مسار الجسم وسرعته بالنسبة للزمن، ذلك من أجل دور حركة $T=0.5s$ وبخطوة قدرها $110mm$.

بفرض المحور U هو محور الحركة بأي اتجاه (أي مسار الجسم بخط مستقيم). تكون الحركة السابقة ضمن المستوى XY , كما مبين في (الشكل 22)، وبالتالي يمكن كتابة مركبات الحركة بالنسبة لجملة إحداثيات الجسم بالعلاقة التالية:



الشكل 22: اتجاه الحركة بحسب المحور U الذي يصنع مع المحور X زاوية θ .

$$\begin{aligned}x(t) &= \cos(\theta)u(t) \\y(t) &= \sin(\theta)u(t)\end{aligned}$$

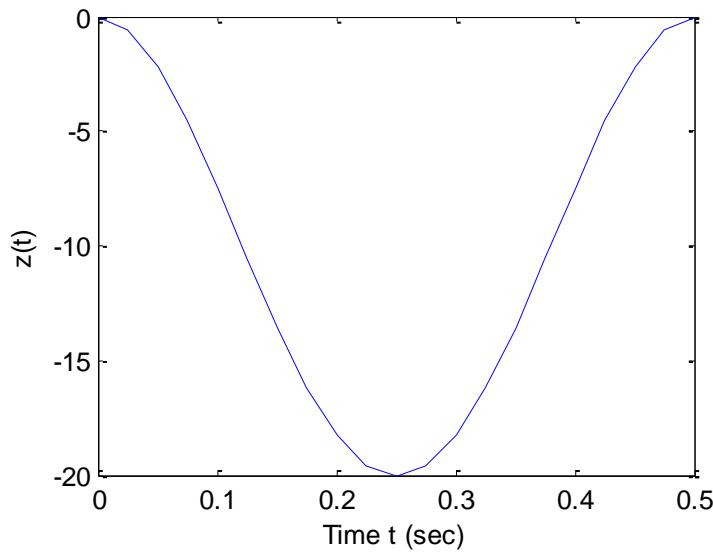
حيث θ هي اتجاه الحركة (الزاوية بين المحور X والمحور U).

كما تحدثنا سابقاً بالنسبة للمسار المطبق من أجل حركة السير، يتتألف مسار الحركة من قطعة مستقيمة في المستوى X,Y بالنسبة للثلاثية الأولى ومن قطع مكافئ في الفضاء X,Y,Z بالنسبة للثلاثية الثانية. وبالتالي تجزأ الحركة (الثلاثية الثانية) إلى مركبتين محمولتين على Y,X ومن مركبة على المحور Z.

بالنسبة للحركة على المحور Z ، أي للحصول على المسار المبين في (الشكل 19) وهو من الدرجة الثانية بالنسبة للموضع. نفرض معادلة الحركة على المحور Z من الدرجة الثانية بالنسبة لـ $u(t)$. ولإيجاد الثوابت نحتاج لثلاثة معاليم (الارتفاع z في بداية الدور ونهايته معدوم، وفي منتصف الدور يكون (-h) ارتفاع الخطوة):

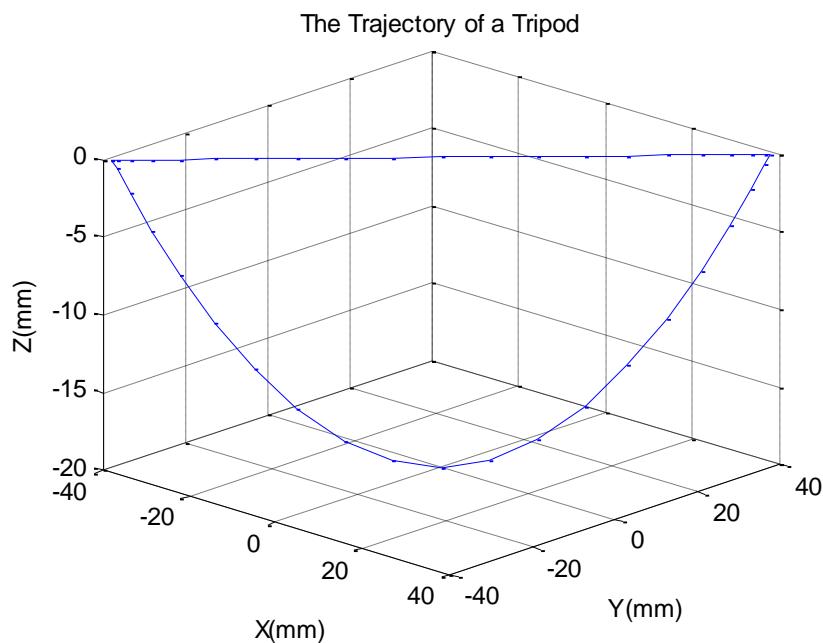
$$\begin{aligned}z(t) &= au(t)^2 + bu(t) + c \\z(0) &= 0 \\z(T) &= 0 \\z(T/2) &= -h\end{aligned}$$

بحل المعادلات الثلاثة نحصل على الثوابت a,b,c. نرسم التابع z بالنسبة للزمن فيكون كما في (الشكل 23):

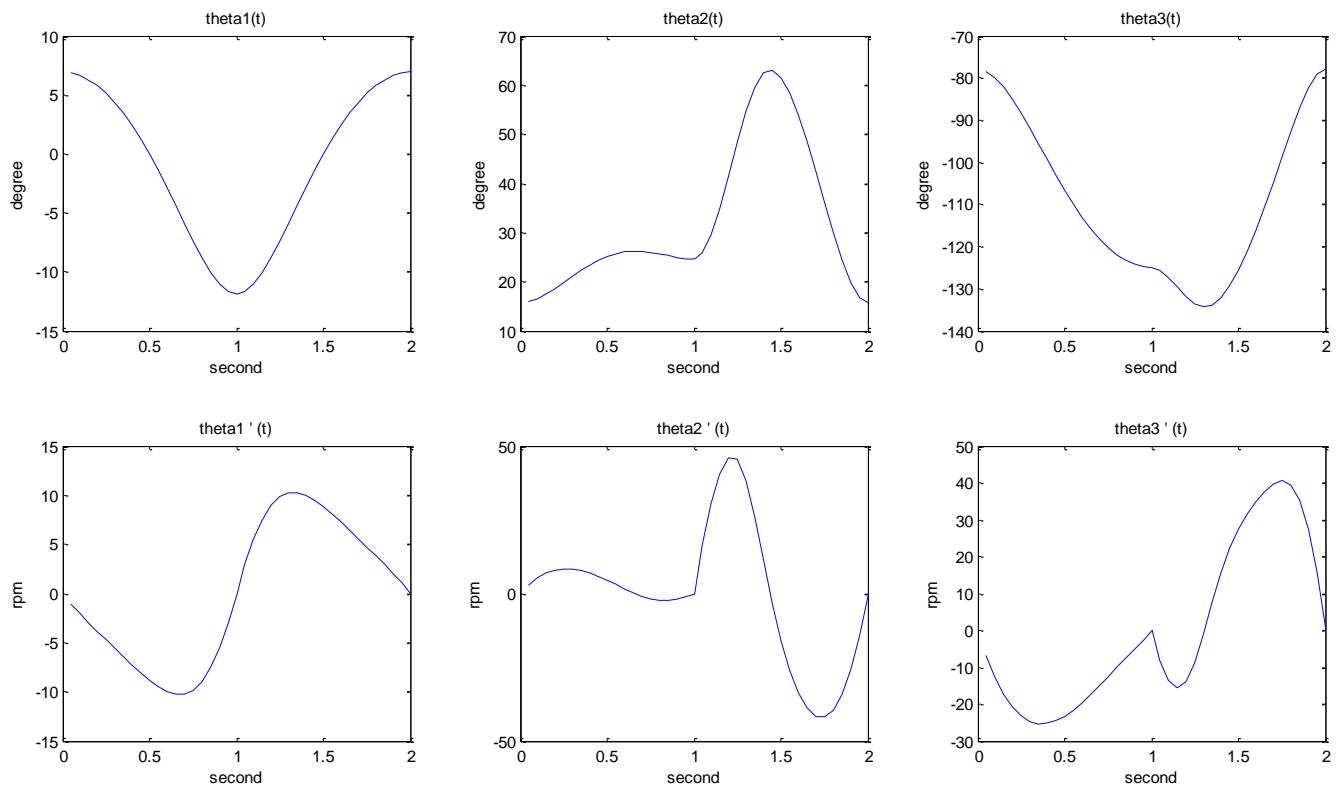


الشكل 23- تغير الارتفاع Z للجسم بالنسبة للزمن من أجل دور $T=0.5\text{ s}$ وارتفاع خطوة $h=20\text{ mm}$. يضاف للمسار السابق ارتفاع الجسم عن الأرض.

ما سبق نستطيع الحصول على المسار المطبق على الجسم بالنسبة لثلاثية معينة بالأخذ بعين الإعتبار اتجاه الحركة كما هو مبين في (الشكل 24). نستطيع أيضاً الحصول على تغير زوايا الروابط وتغير السرعات الزاوية بالنسبة للزمن كما مبين في (الشكل 25).



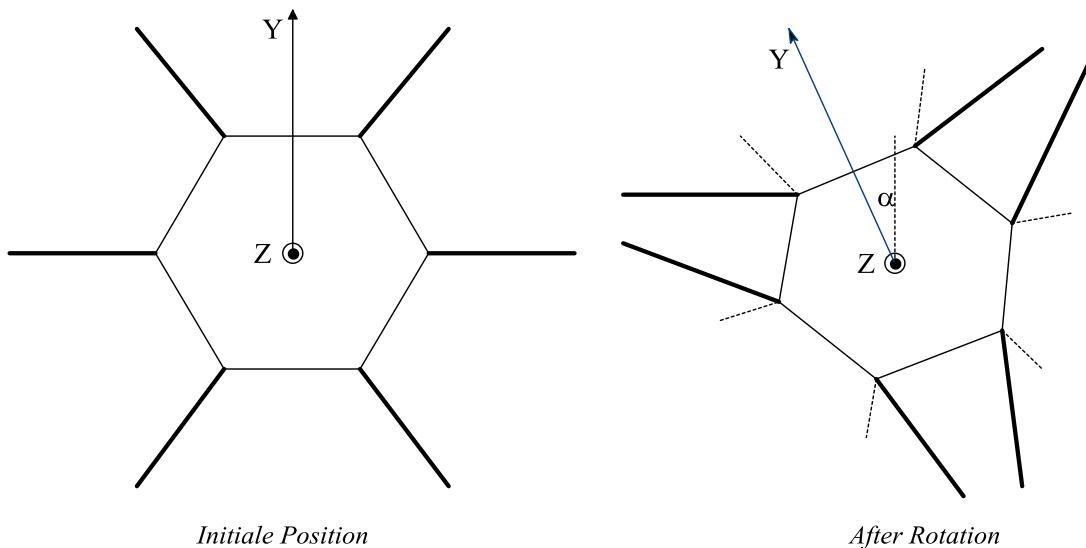
الشكل 24: يبين المسار المطبق على الجسم في الفضاء (X, Y, Z) الذي من خلاله نستطيع الحصول على كافة المتحولات الرابطية باستخدام النموذج العكسي. اتجاه الحركة $\theta=45^\circ$ ، مقدار الخطوة 110 mm ، وارتفاع الخطوة $h=20\text{ mm}$.



الشكل 25: يبين تغير زوايا رجل معينة ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) والسرعات الزاوية من أجل خطوة كاملة وبدور حركة $T=2s$.

11-2. الدوران في المكان باستخدام النمط الثلاثي

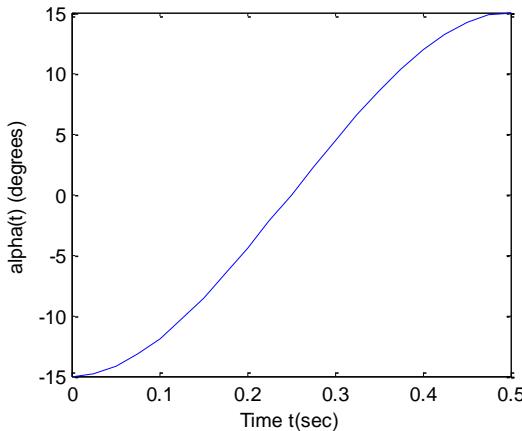
تقوم حركة الدوران على نفس مبدأ السير باستخدام النمط الثلاثي، وتعني الدوران بزاوية α حول المحور Z أي الدوران في المكان. يجب على الثلاثية الأولى (المتأرجحة) أن ترتفع في الهواء وتدور حول مركز الجسم بزاوية معينة، وفي هذه الأثناء على الثلاثية الثانية (المستندة على الأرض) أن تجعل الجسم يدور بزاوية α ويوضح (الشكل 26) خطوات الدوران.



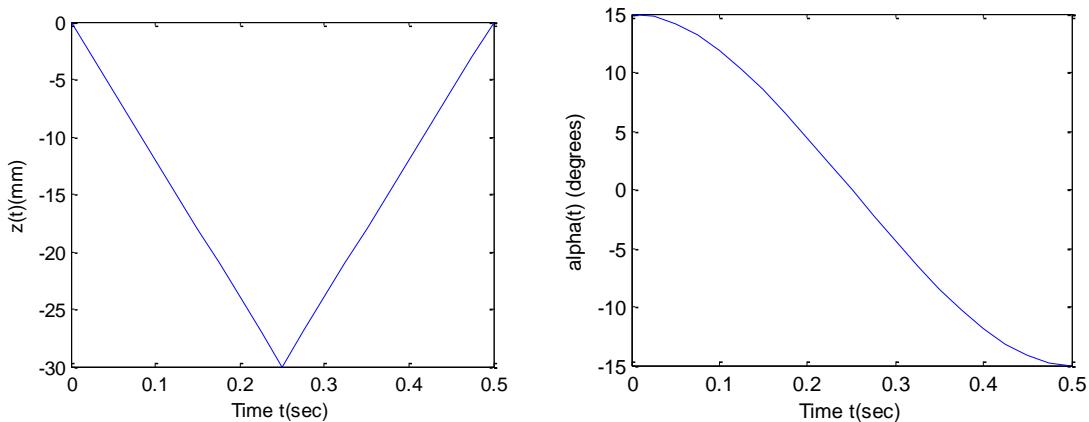
الشكل 26: يوضح الخطوة الأولى لعملية الدوران في المكان بزاوية α .

بالنسبة لكيفية وضع المسار فيجب تطبيق مسار زاوي على جملة الجسم بزاوية معينة ثم إيجاد المتحولات الرابطية المتعلقة بالثلاثية المستندة، وفي نفس الوقت نطبق مسار دوراني مععكس للزاوية السابقة مع حركة نزول وصعود على المحور Z ، ثم إيجاد المتحولات الرابطية المتعلقة بالثلاثية الثانية (عند تطبيق هذا المسار على Z بالنسبة للثلاثية الثانية ترتفع نقاط نهاية الأرجل في الهواء).

توجد صعوبة بالنسبة لتطبيق المسار في الفضاء $(X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma)$ ، لذلك ولتسهيل العملية نقسم هذا الفضاء إلى فضائيين الأول (X, Y, Z) والثاني (α, β, γ) . يبين (الشكل 27 والشكل 28) المسار المطبق على الثلاثية الأولى والثانية. نلاحظ كما تحدثنا من أجل نمط السير أن الثلاثة الأولى تعمل على دوران الجسم والثلاثية الثانية ترتفع في الهواء.



الشكل 27: المسار المطبق على النموذج العكسي الكلي للثلاثية الأولى (المستندة على الأرض) من أجل دور حركة $T=0.5s$ وزاوية دوران $\alpha=30^\circ$.



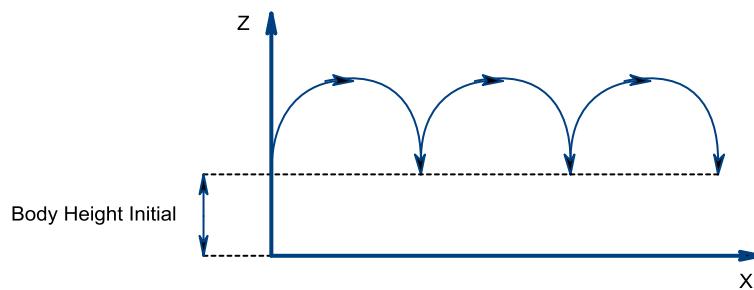
الشكل 28: المسار المطبق على النموذج العكسي للثلاثية الثانية (المتأرجحة) في الفضائيين (α, β, γ) من أجل الدوران $h=30mm$ وزاوية دوران $\alpha=30^\circ$ وارتفاع عن الأرض (X, Y, Z) من أجل التأرجح في الهواء. دور حركة $T=0.5s$

3-11-2. نمط الأرضي الوعرة

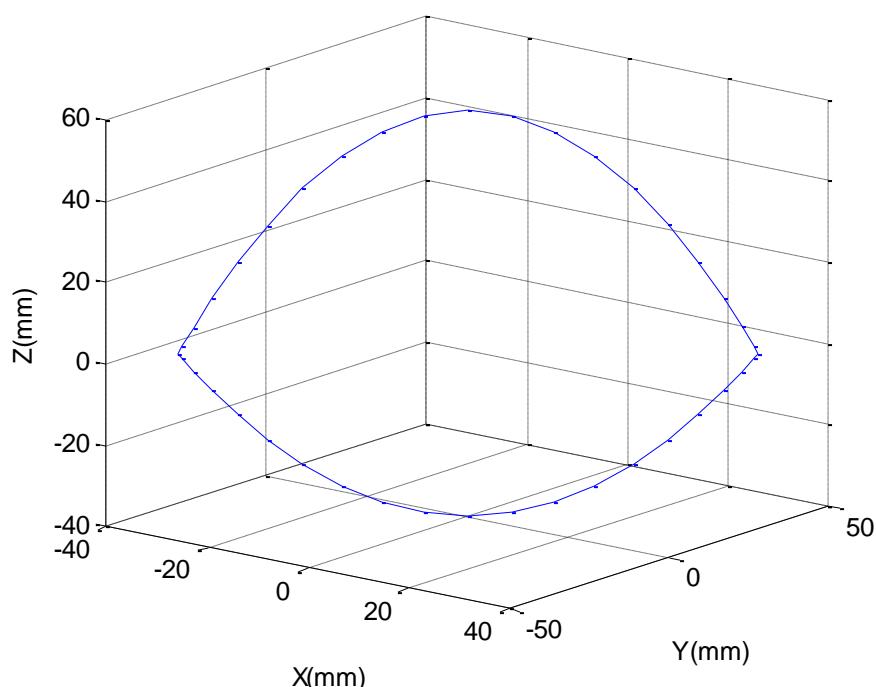
في نمط السير السابق كما تحدثنا في الفقرة (1-11-2) تعمل الثلاثية الأولى على سحب الجسم في المستوى الأفقي بينما ترتفع الثلاثية الثانية وفي نفس الوقت في الهواء وتتقدم. بالنسبة للأراضي الوعرة فيجب أن ترتفع الرجل في الهواء بشكل كبير نسبياً، حيث أنه في النمط السابق تستطيع الرجل الارتفاع - بحسب فضاء - بمقدار 40cm تقريباً (كما تبين نتائج المحاكاة (6-5)).

في هذا النمط تعمل الثلاثية الأولى على سحب الجسم مع الارتفاع في الهواء بينما تقوم الثلاثية الثانية بنفس الحركة المطبقة في نمط السير العادي. وبالتالي ارتفاع الرجل في الهواء يصبح أعلى (ضمن فضاء العمل) لأن الجسم يرتفع أيضاً. يوضح (الشكل 29) مسار الجسم المتكرر بالنسبة لجملة مرجعية خارجية ، كما يوضح (الشكل 30) المسار المطبق على الجسم في الفضاء

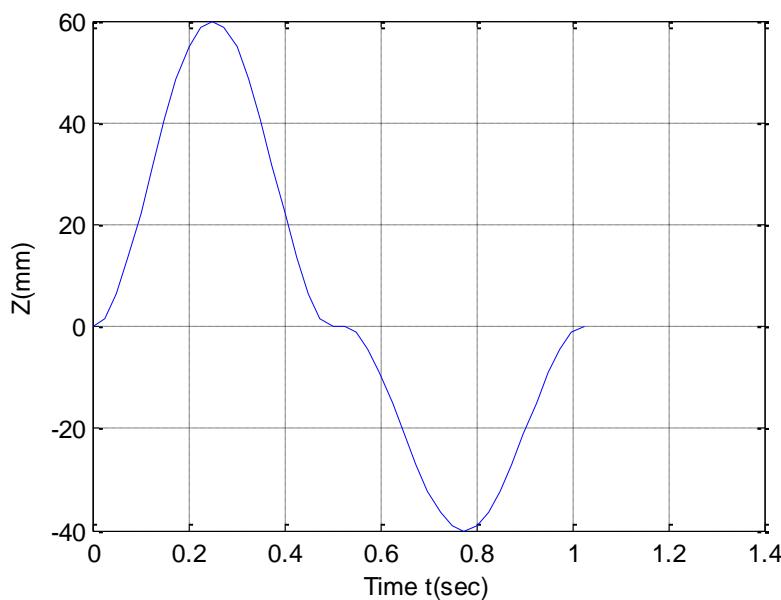
الشكل 31) ويبيّن المسار المطبق على Z بالنسبة للزمن (من الدرجة الثانية بالنسبة ل u (X,Y,Z) ومن الدرجة الرابعة بالنسبة للزمن).



الشكل 29: يبيّن المسار المتكرر للجسم بالنسبة لجملة مرجعية خارجية.



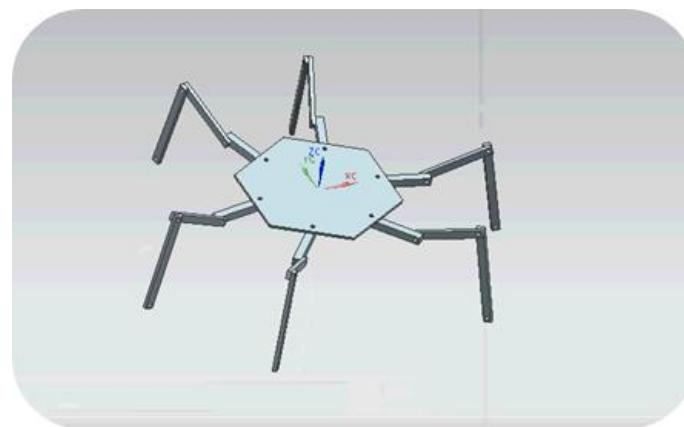
الشكل 30: المسار المطبق على الجسم (الثلاثية الأولى) من أجل نمط الأرضي الوعرة، مقدار الخطوة (110mm) وارتفاع الخطوة يصبح (h=40+60=100mm) واتجاه سير $\theta=45^\circ$.



الشكل 31: المسار المطبق على Z بالنسبة للزمن من أجل دور حركة سير $T=1\text{sec}$ ، ارتفاع خطوة $(h=40+60=100\text{mm})$

12-2- المحاكاة باستخدام UniGraphics

بعد حساب المسارات التي تحدثنا عنها باستخدام برنامج *Matlab*، قمنا بالتأكد من صحة العمل باستخدام برنامج *UniGraphics*. حيث تم تطبيق حركة السير والدوران باستخدام النمط الثلاثي (3×3) كما مبين في (الشكل 32).



الشكل 32: المحاكاة الحركية لحركة السير والدوران بالنمط الثلاثي، باستخدام *UniGraphics*

الفصل الثالث

3- التصميم الميكانيكي

1-3 . مقدمة

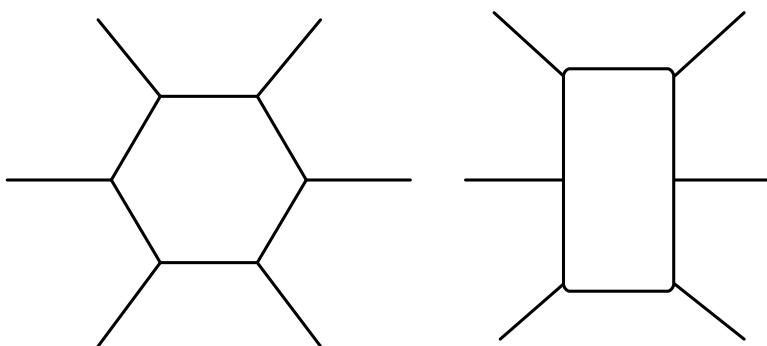
في بداية عملية التصميم نحتاج للمناقشة الهندسية العلمية ووضع الحلول الممكنة للمسائل التي ستواجهنا واختيار الحل الأمثل والممكن تنفيذه في ورش المعهد العالي (التصميم لأجل التنفيذ). عند تصميم الروبوت سنراعي موضوع خفة الوزن الذي سينعكس على الطاقة المستهلكة وبالتالي زمن استثمار الروبوت.

2-3 . الحلول والتصميم

1-2-3 . الشكل العام

كما تحدثنا سابقاً أنه تم تصميم عدة أشكال للروبوت منها المسدس ومنها المستطيل ولكن منها فوائد ومحاسن.

الحل الأول وهو الشكل المستطيل وفيه توزع الأرجل الست على جانبي المستطيل كما مبين في (الشكل 33). يتميز هذا التصميم بمنطقة توازن تمكّنه من السير بخطوة كبيرة نسبياً للأمام (المسافة التي يمكن بها نقل مركز العطالة). لكن بالنسبة للسير في الإتجاه الجانبي فله نقطة ضعف في أن المسافة صغيرة نسبياً وأنه معرض لفقدان التوازن في حالة السير بسرعة كبيرة نسبياً بسبب العطالة.



الشكل 33: يظهر حلین للشكل العام لجسم الروبوت، المستطيل والمسدس المنتظم.

الحل الثاني وهو الشكل المسدس وفيه توزع الأرجل على رؤوس مسدس منتظم كما في (الشكل 33). حيث تم الإثبات نظرياً [02] أن هذا النوع من الروبوتات يمتاز بمنطقة توازن أكبر وقدرة على السير في كافة الإتجاهات، مقارنة بالروبوتات ذات الشكل المستطيل وهذا مانريده.

أضف إلى ذلك أن هذا النوع يمكن أن يؤمن زاوية دوران في المكان أكبر من النوع السابق (المستطيل)

2-2-3. تصميم الروابط

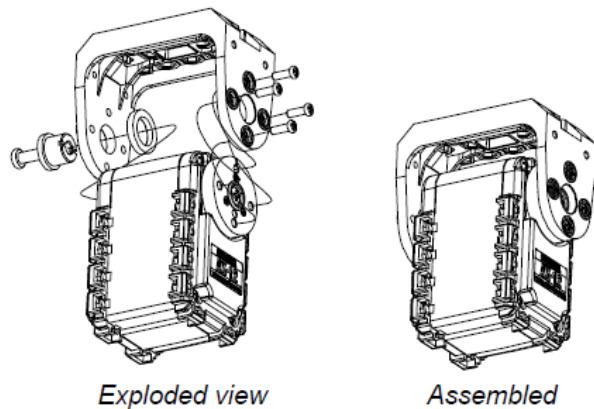
نبدأ أولاً بتصميم الرجل والتي هي الجزء الأساسي في الروبوت ويجب مراعاة خفة الوزن وسهولة التصنيع لأنه يجب تكرارها ست مرات. تتألف الرجل من ثلاثة روابط دورانية مفعلة وبالتالي تحتاج لثلاث محركات في كل رابطة. تعتمد طريقة تصميم هذه الروابط بشكل مباشر على المحركات المختارة AX-12A.

إن خرج لmotor كما مبين في (الشكل 34) عبارة عن قرص يدور مع المحرك ويمكن التثبيت عليه. سنعتمد طريقة التوصيل المباشر للمحرك ذلك لأنه يحتوي على علبة سرعة ولو لم يكن على خرجه. توجد طريقتان للتثبيت، من طرف واحد ومن طرفيين.



الشكل 34: المحرك المستخدم AX-12A

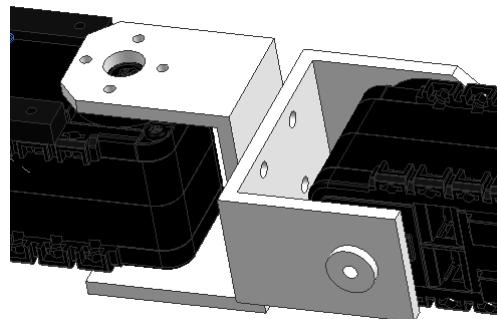
التوصيل من طرف واحد أسهل تصميمياً لكنه يؤدي إلى فقدان التناول في توزيع الحمل على المحرك. أما الحل الثاني فهو أصعب نسبياً لكنه يؤمن توزيع الحمل على طرفي المحرك بشكل متوازن. يتم الربط مع قرص المحرك من جهة ثم من الجهة الأخرى كما مبين في (الشكل 35)، حيث يمتلك المحرك حاضنة لجبلة وجاء مقلوب لتثبيت هذه الجبلة باستخدام برغي.



الشكل 35: طريقة الربط مع المحرك المستخدم من الجهازين، من النشرة الفنية للمحرك.

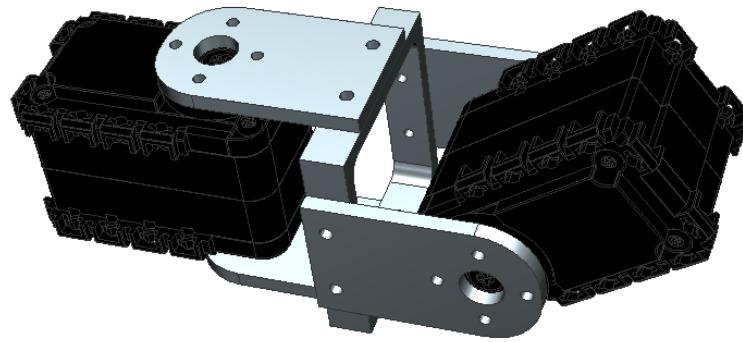
1-2-2-2-1. الرابطة الأولى (*Coxa*)

إن هذه الرابطة تربط بين المحرك الأول والثاني (كما مبينة في المخطط الحركي لرجل واحدة (الشكل 7)). هذه الرابطة مكررة ويجب اعتماد طريقة مماثلة لتصميمها ويوجد حلان. الحل الأول عبارة عن قطعتين بشكل حرف U وكل منها متصل بالمحرك كما في (الشكل 36). نلاحظ أن هذا الحل بسيط نوعاً ما ويؤمن المطلوب، لكن تنفيذ هذه القطعة باستخدام الآلة المبرمجة يتطلب وقتاً طويلاً نسبياً لذلك يجب تجنب هذا الحل.



الشكل 36: الحل الأول لتصميم الرابطة الأولى.

يجب الأخذ بعين الإعتبار التصميم لأجل التنفيذ لذلك افتحنا الحل الثاني الذي يشبه الأول لكن الرابطة عبارة عن 5 قطع متماثلة يتم تجميعها كما في الشكل (الشكل 37 الشكل 36). هذا الحل يؤمن المطلوب ويتطلب زمناً أقصر للتنفيذ (تكرار قطع متشابهة بسطية).

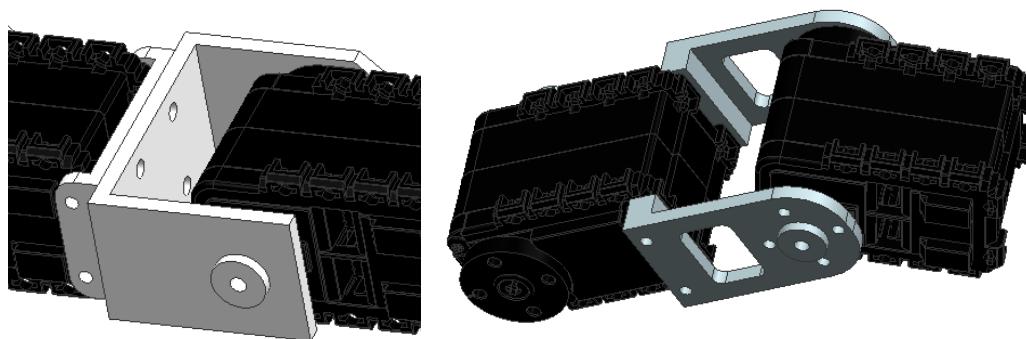


الشكل 37: الحل الثاني لتصميم الرابطة الثانية.

نختار مادة الرابطة الألمنيوم لخفة الوزن وبسماكة $3mm$ وبالتالي يصبح وزن الرابطة $40g$. تثبت القطع مع بعضها باستخدام برااغي. ونختار البعد بين محوري المحركيين (وهو البعد المميز لهذه الرابطة) $.68mm$.

2-2-2-2- الرابطة الثانية (*Feumer*)

ترتبط هذه الرابطة بين المحرك الثاني والثالث، وتحديداً تربط جسم المحرك الثاني من جهة وقرص المحرك الثالث. بنفس المناقشة السابقة نجد أن هناك حلان. الحل الأول كما مبين في (الشكل 38) يحتاج لتصميم قطعة بحرف U وأيضاً تحتاج لزمن تنفيذ كبير أما الحل الثاني فهو أبسط ومبين في الشكل نفسه.

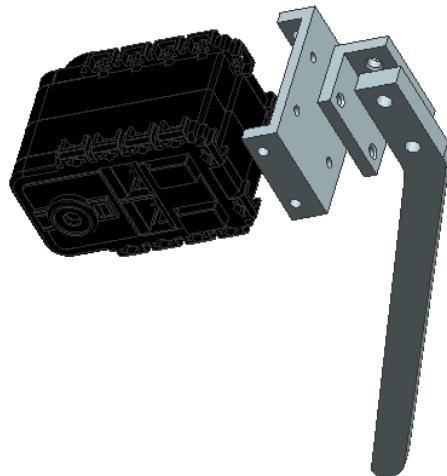


الشكل 38: الحل المقترhan من أجل الرابطة الثانية ونختار الحل الموجود على اليسار.

نختار سماكة القطعة $3mm$ ويكون البعد المميز هو البعد بين محور المحرك الثاني والمotor الثالث والذي هو $(53mm)$. أيضاً المادة هي الألمنيوم ليصبح وزن القطعتين معاً $.30g$.

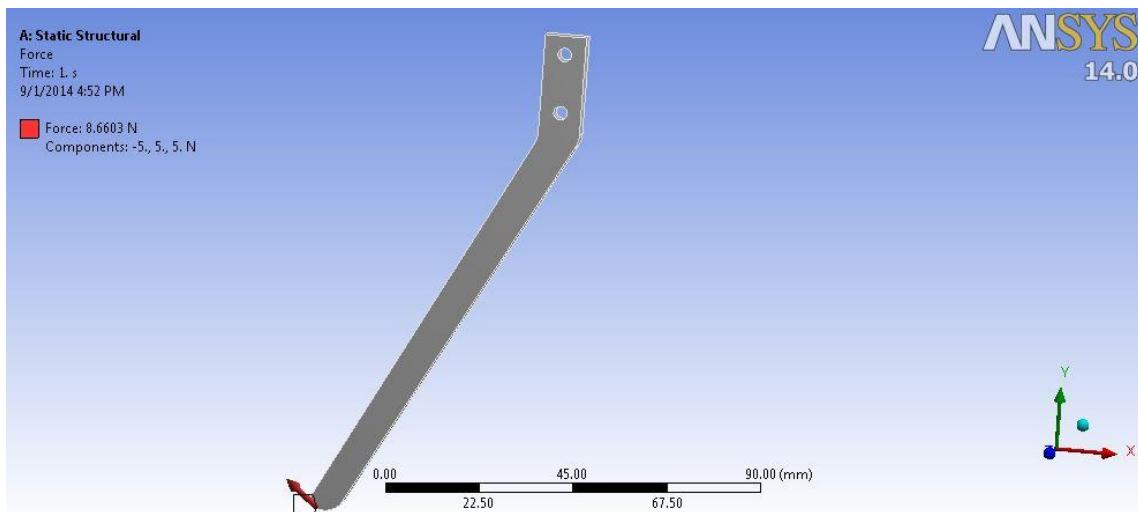
2-2-3- الرابطة الثالثة (*Tibia*)

هي التي تربط بين جسم المحرك الثالث والأرض ويجب أن تؤمن رابطة كروية مع الأرض كما تحدثنا في فصل سابق. نحتاج لتصميم ثلاثة قطع كما في (الشكل 39) وإن بعد المميز لهذه الرابطة هو بعد بين محور المحرك الثالث ونقطة نهاية الرجل وهو $100m$. نختار سماكة القطعى الحاملتين للرجل النهائية $3mm$. أما من أجل القطعة النهائية للرجل فنختار سماكة $5mm$ ذلك لمنع التقوس الناتج من عملية التشغيل. أيضاً نختار مادة الألمنيوم لخفة الوزن المطلوب.

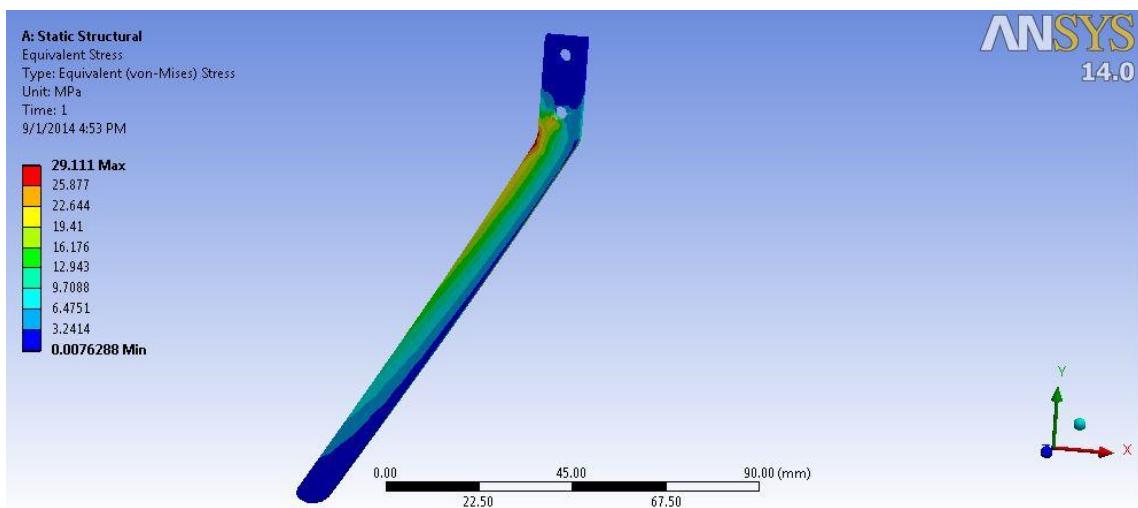


الشكل 39: تصميم الرابطة الثالثة بين المحرك الثالث والأرض.

نقوم بدراسة القطعة على برنامج العناصر المنتهية *Ansys13* لاختبار مثانتها. ثبتت القطعة من جهة تثبيتها مع حامل الرجل أي من التقوب، ثم نطبق قوة ذات طولية $10N$ كما مبين في (الشكل 40) في أسوأ حالة. نلاحظ أن الإجهاد المكافئ (*Von-Mises*) بحسب الناتج من هذه القوة $29MPa$ وهو أصغر من إجهاد الخضور لمادة الألمنيوم (6061). $125MPa$



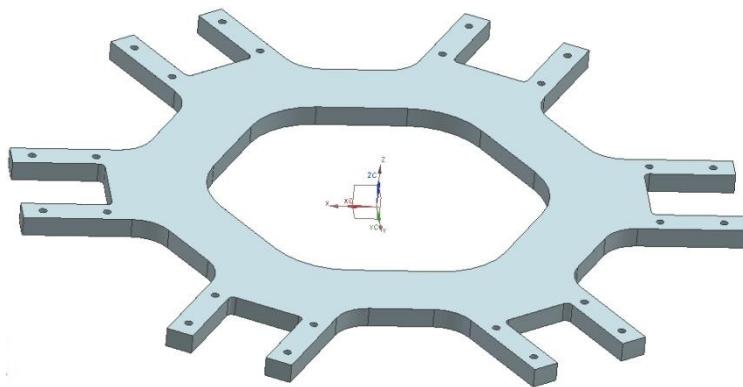
الشكل 40: تطبيق قوة في الاتجاه المبين، أسوأ حالة هي أن يكون الروبوت مستندًا على ثلاثة أرجل.



الشكل 41: الإجهاد المكافئ حسب .*Von-Mises*

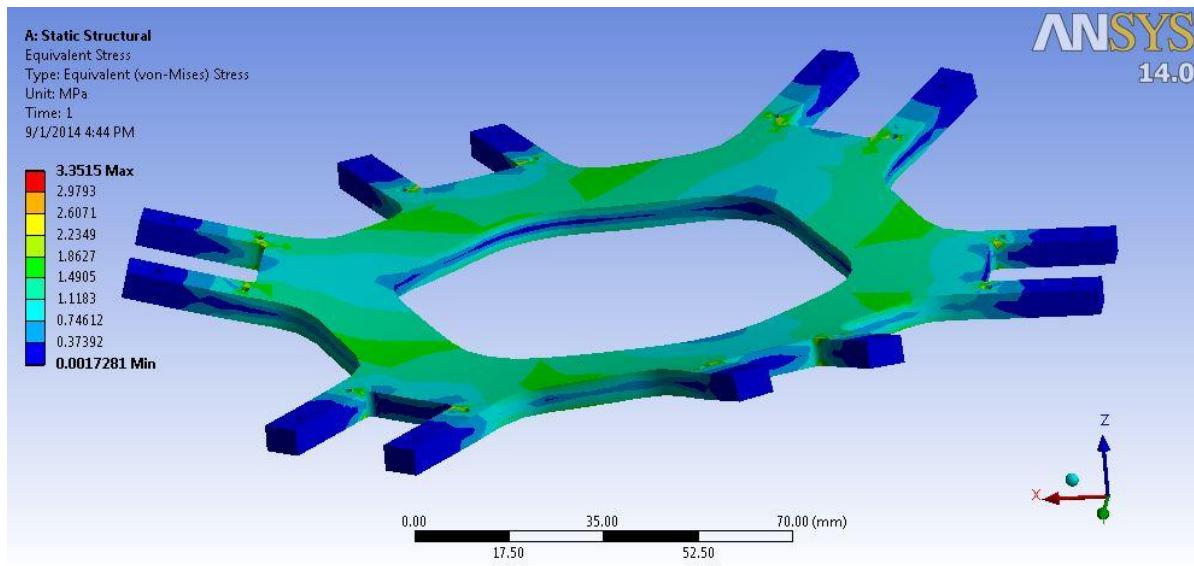
3-2-3. القاعدة السفلية والعلوية

إن وظيفة القاعدة السفلية ربط الأرجل الست، ولها شكل مسدس منتظم (الشكل 42). إن البعد المميز لها هو البعد بين مركز القاعدة ومحور المحرك الأول وهو $100mm$. يتم تثبيت المحرك الأول في الحاضنة المخصصة له. نختار أيضاً مادة الألمنيوم ونقوم بتفريغها. من أجل التنفيذ وتجنب التقوس الناتج عن التشغيل نختار السماكة $5mm$ فيكون وزنها $120g$.



الشكل 42: شكل القاعدة المنسدس المنتظم.

من أجل اختبار متانة القاعدة من الحمل المطبق عليها. باستخدام برنامج العناصر المنتهية *Ansys13* ثبت ثلاثة مواضع (ثبيت المحركات) ونطع على ثلاثة مواضع أخرى قوة شاقولية مقدارها $10N$ (أسوأ حالة ثلاثة أرجل على الأرض). نجد أن الإجهاد المكافئ بحسب $3MPa$ هو *Von-Mises* أي أنها في منطقة الأمان (الشكل 43).



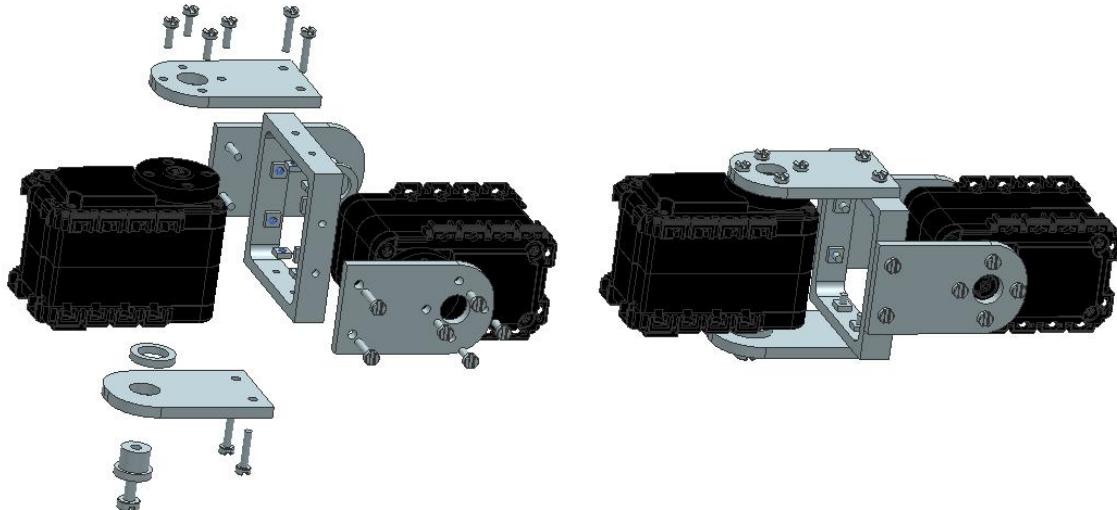
الشكل 43: الإجهاد المكافئ بحسب *Von-Mises*.

يتم إضافة قاعدة علوية مبنية في فقرة التجميع من مادة *Plexiglass* لخفتها وزنها حيث أن هذه القاعدة لا تعمل على ربط الأرجل مع بعضها وإنما تعمل عمل غطاء (ربط الأرجل يتم عن طريق القاعدة السفلية). نختار سماكة $3mm$ فيكون وزنها $.55g$.

3-3- التجميع

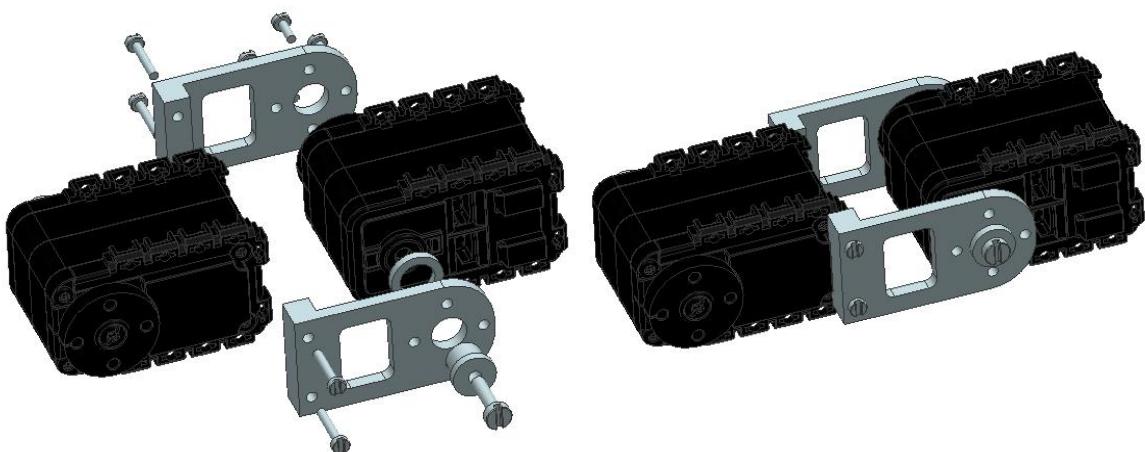
نتبع الخطوات التالية للتجميع:

نجع المحرك الأول مع الرابطة الأولى بالإضافة للمحرك الثاني باستخدام براغي M2، حيث أن الإزواج خلوصي في الجلبة المتمحورة مع المحرك كما في (الشكل 44)، حيث يتم تثبيت الجلبة على المحرك باستخدام برجي M3x12.



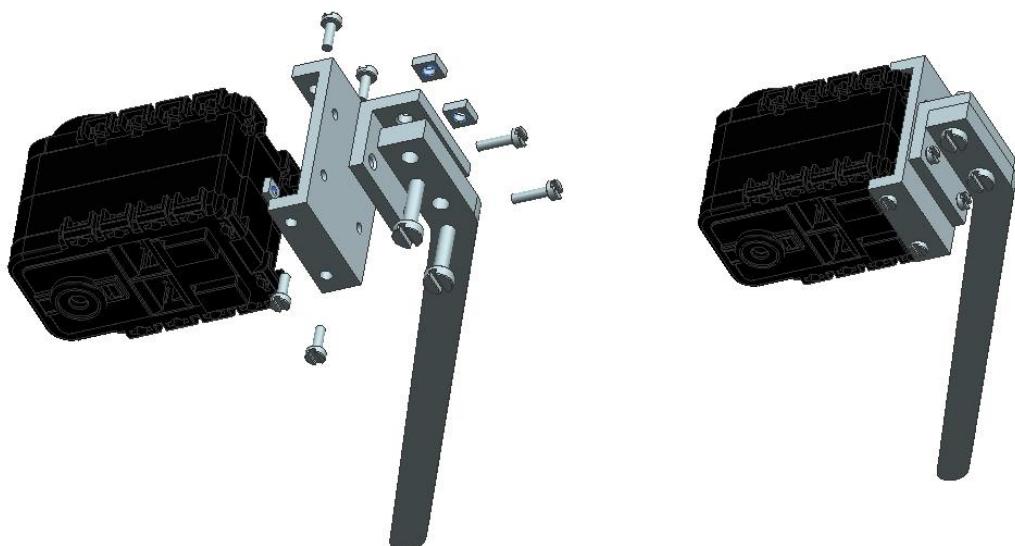
الشكل 44: تجميع الرابطة الأولى.

نقوم بتجميع الرابطة الثانية بالإضافة للمحرك الثالث، كما مبين في (الشكل 45).



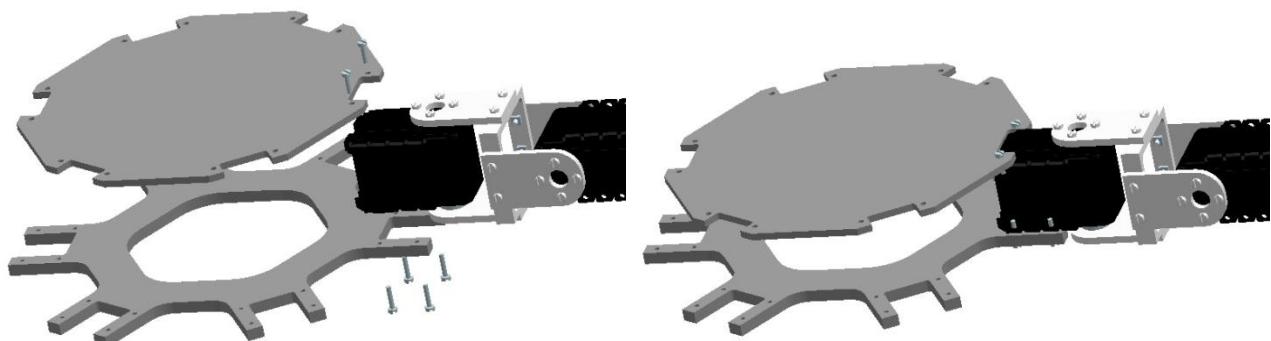
الشكل 45: تجميع الرابطة الثانية.

نجع الرابطة الثالثة سابقاً كما في (الشكل 46)، وبالتالي تصبح كامل الرجل جاهزة ونعيد مasicب خمس مرات.

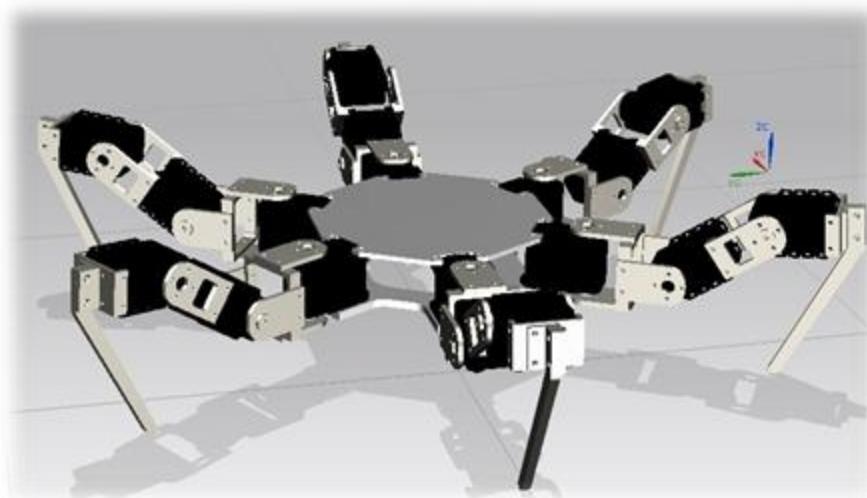


الشكل 46: تجميع الرابطة الثالثة.

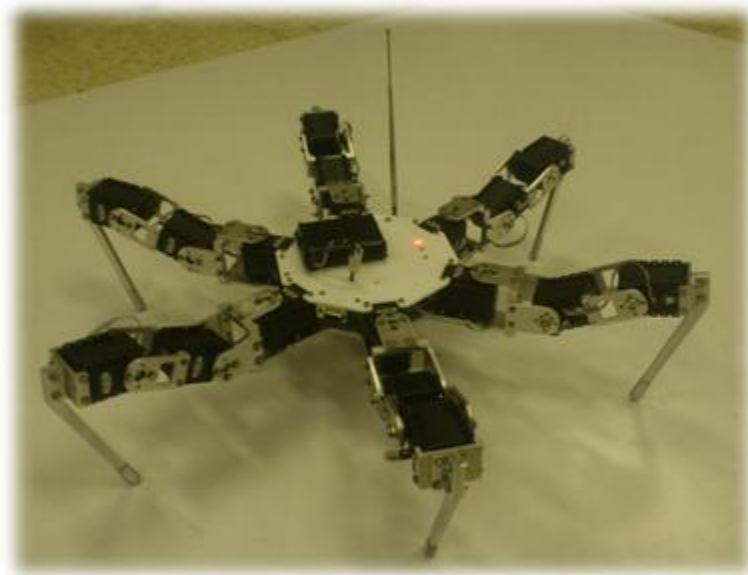
نثبت الأرجل الست مع القاعدة السفلية أي المحرك الأول مع الحاضنة بإزدواج انتقالى كما مبين في (الشكل 47)، فتصبح البنية الأساسية جاهزة. نجمع القاعدة العلوية مع كامل الجسم.



الشكل 47: تجميع الرجل مع الجسم المؤلف من القاعدة السفلية والعلوية.



يوضح (الشكل 48) التصميم النهائي الذي تم تصنيعه في ورشة المعهد العالي.



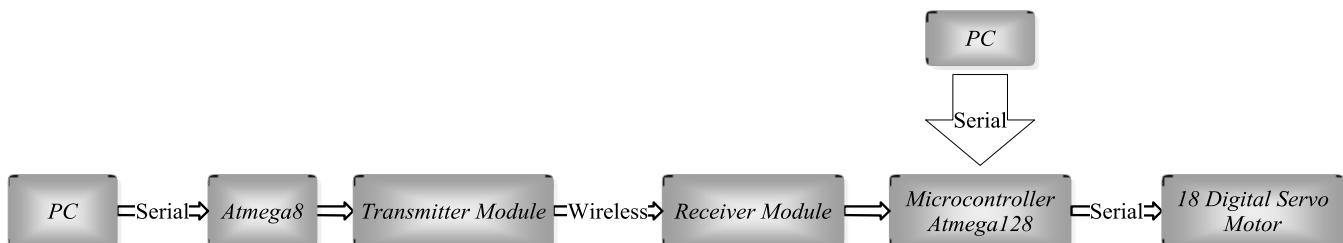
الشكل 48 : التصميم النهائي بعد التنفيذ والتجميع.

الفصل الرابع

التصميم الإلكتروني

1-4- المخطط الصندوقي

يتتألف بشكل رئيسي من متحكم صغرى *Atmega128* كما مبين في (الشكل 49) ويتم من خلاله حساب المسارات الحركية وأوامر المحركات، ثم إرسالها عبر البوابة التسلسلية الأولى. يتم تلقي أوامر الضبط والفحص للروبوت من قبل الحاسب عبر البوابة التسلسلية الثانية – وذلك قبل بدء المهمة. ترسل أوامر الحركة بشكل عام لاسلكياً عن طريق مایلی، من الحاسب إلى دارة الإرسال (المؤلفة من متحكم صغرى *Atmega8* ويتم تغليف هذه الأوامر في إطار قبل إرسالها إلى وحدة الإرسال وسيتم التحدث عنها لاحقاً). يتم استقبال الأوامر عبر وحدة الإستقبال ومن ثم إلى المتحكم الصغرى الرئيسي *Atmega128*. سيتم تفصيل هذه المراحل فيما بعد.

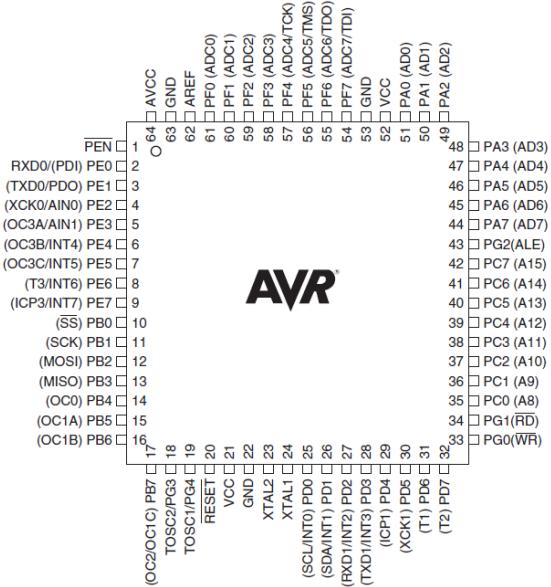


الشكل 49: المخطط الصندوقي للدارة الكهربائية.

2- اختيار المتحكم الصغرى

تم اختيار المتحكم الصغرى *Atmega128* (الشكل 50) بناءً على عدد البوابات التسلسلية التي يستطيع تأمينها. حيث كما ذكرنا سابقاً أننا نحتاج للتalking مع الحاسب مباشرةً من أجل عملية الضبط والفحص، ومن جهة أخرى للتalking مع المحركات وبالتالي نحتاج لبوابتين.

بعد تقدير لحجم المتحولات اللازمة لتنفيذ المعادلات الحركية والذي بلغ $2.5KB$ بشكل أعظمي، وبالتالي نحتاج لذاكرة وصول عشوائية *RAM* أكبر من هذه القيمة. يتميز المتحكم الصغرى *Atmega128* بـ *RAM* حجمها $4KB$. إن سرعة التراسل الإفتراضية للتalking مع المحركات هي *1Mbps* (قابلة للتغيير)، وبالتالي للتواصل المبدئي يجب على المتحكم أن يؤمن هذه السرعة وذلك بوجود مهتز ذو تردد ($16MHz$).



الشكل 50: يوضح مداخل المتحكم الصغير المستخدم .Atmega128

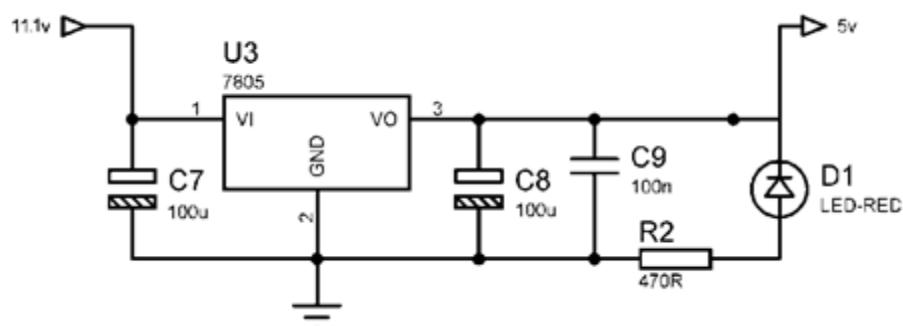
3-4- التغذية والبطاريات

يتم اختيار البطاريات بناءً على المحركات المستخدمة حيث أن جهد المحركات المحبد من قبل المصنع (11.1V). بما أننا نصمم روبوت منتقل فيجب أن نبحث عن بطاريات ذات وزن خفيف (الوزن الأعظمي المسموح 250g). كما أنه يجب تقدير التيار المسحوب من قبل الدارة والمحركات، تم تقدير التيار المسحوب الكلي الأعظمي 3A (وسيطياً 2A). باختيار ثلاثة وحدات من البطارية (LC 3.7V 18650 2200mAh-Rechargeable) (الشكل 51) والتي تتميز بتيار تفريغ أعظمي 4.4A. وبالتالي يتم تأمين المطلوب أي يصبح لدينا بطارية (11.1V-2200mAh). كما أن وزن الخلية الواحدة 50g اي يصبح الوزن الكلي 150g. وبالنظر للتيار المسحوب وسيطياً 2A نستطيع تقدير مدة استثمار الروبوت بساعة واحدة.



الشكل 51 البطارية المستخدمة المؤلفة من ثلاثة خلايا قابلة للشحن.

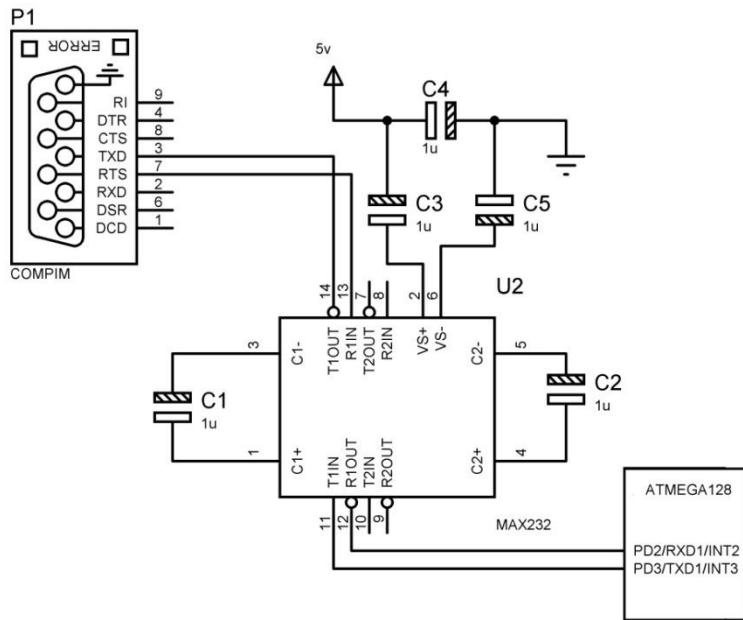
يتم تغذية المحركات مباشرةً من البطاريات، أما بالنسبة للدارة الرئيسية فإن الجهد المفضل من قبل كافة الدارات المتكاملة المستخدمة هو (5V). وبالتالي يجب وضع منظم جهد L7805 كما مبين في (الشكل 52).



الشكل 52: دارة منظم الجهد الدارة الرئيسية.

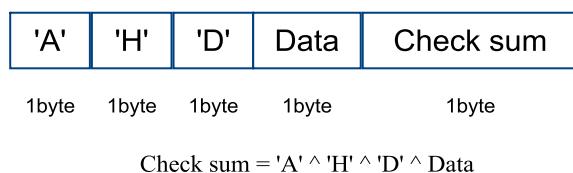
4-4- التخاطب مع الحاسب

عند عملية الضبط والفحص قبل بدء المهمة يتم التخاطب مع الحاسب عبر البوابة التسلسليّة الثانية (RXD1,TXD1). حيث يتم إرسال إطار المعطيات من الحاسب إلى المتحكم الصغرى بسرعة 115200bps (في وضعية التجريب يتم إرسال الإطار مباشرةً إلى المحركات بسرعة 1Mbps). يتم وصل البوابة التسلسليّة للمتحكم الصغرى مع البوابة التسلسليّة للحاسب. بما أن البوابة التسلسليّة في الحاسب تعمل بنمط (-12v,+12v) تحتاج لوضع دارة لتكييف هذا الجهد مع جهد المتحكم الصغرى (0v,5v) وهي Max232 ويتم توصيلها كما مبين في (الشكل 53).



الشكل 53: طريقة وصل الدارة المتكاملة *Max232* لتأمين التخاطب التسلسلي مع الحاسب.

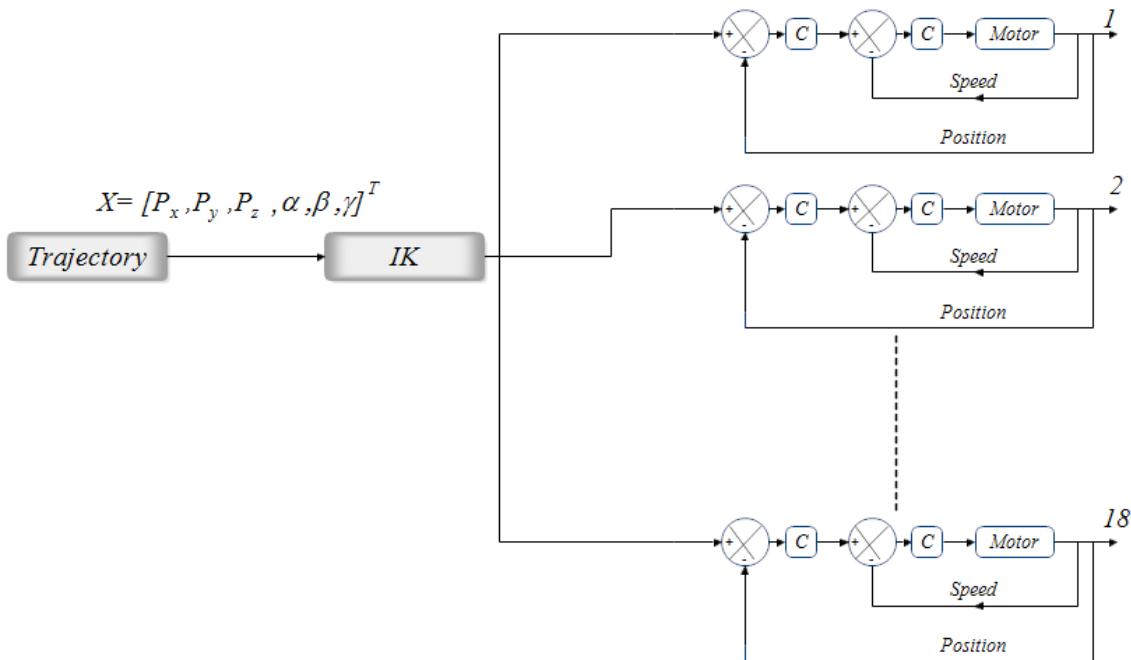
يتم وضع أوامر التخاطب في إطار (*Frame*) وذلك لتحسينه من الضجيج، الإطار المستخدم مكون من ترويسة 3byte، ثم المعطيات 1byte (*check sum*)، ثم 1byte (*check sum*) كما مبين في (الشكل 54).



الشكل 54: الإطار المستخدم للتخاطب من الحاسب إلى المتحكم الصغير *Amtega128*

5-4- المحركات

تم حساب العزم اللازم من المحركات لتأمين الحركة المطلوبة سابقاً وهو ($1Nm$) بدون معامل أمان ويجب على المحرك المختار أن يؤمن أكبر من هذا العزم، كما يجب أن يكون خفيف الوزن نسبياً. لكن من الناحية الإلكترونية فإن عدد المحركات كبير (18 محرك) ويجب أن يؤمن كل محرك حلقة تحكم بالموضع والسرعة كما مبين في (الشكل 55). يتم حساب موضع وسرعة كل محرك وإرسال هذه الأوامر إلى حلقة التحكم الخاصة بكل محرك.



الشكل 55: يبين المخطط التحكمي للروبوت، يتم حساب قيم زوايا وسرع كل محرك عبر النموذج العكسي (IK) ثم إرسالها إلى حلقة التحكم الداخلية الخاصة بالمحرك.

لاختيار المحرك من الناحية الالكترونية، قمنا بفرض الحلول التالية لتأمين هذا النمط من التحكم فكان الحل الأول هو 18 محرك تيار مستمر (DC motor) مع 18 مرمز مطلق (Absolute encoder) أو مقاومة متغيرة موصولة على خرج المحرك إضافة لوجود علبة سرعة. وبالتالي نستطيع تأمين التحكم بالسرعة والموضع المطلق لكل محرك. هذا الحل يتطلب تصميم دارة قيادة وتكرارها 18 مرة وهو غير مكلف، لكن تصميم هذا العدد من الدارات وضمان التشابه هو أمر صعب بالنسبة ل الوقت المقدر للمشروع.



الحل الثاني هو استخدام المحركات المقادة *dc servo motor* كما مبينة في (الشكل 57). هذا الحل أبسط من الحل السابق ويمتاز بوجود حلقة تحكم داخليّة بالموضع فقط لكل محرك. يحتاج كل محرك إلى إشارة *PWM* وبحسب عرض النسبة يتحرك المحرك للموضع المقابل. يحتاج هذا

الحل لعدد كبير من التوصيلات إضافة لصعوبة تأمين التزامن بين المحركات، كما أن تأمين هذا العدد الكبير من الإشارات من متحكم صغير أمر غاية في الصعوبة.



الشكل 56: المحرك *DC servo*

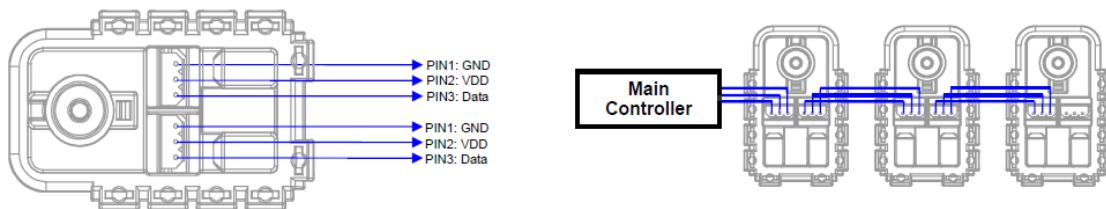
الحل الثالث وهو استخدام المحركات الرقمية الذكية المقدادة *dc smart digital servo* (الشكل 57). تمتاز هذه المحركات بوجود حلقة داخلية للتحكم بالموضع والسرعة معًا إضافة للاستجابة. تمتاز أيضًا بوجود معالج داخلي يمكن التخاطب معه بطريقة *half duplex communication* عبر بوابة تسلسلية، ويمكن وصل عدة محركات على التسلسل أي (*one cable*). كما يمكن التحكم بعدة محركات معًا مع وجود تزامن (سنتحدث عن هذه المحركات لاحقًا). نستطيع بهذا الحل تقليل عدد التوصيلات كما أنه يلبي الاحتياجات التي تحدثنا عنها وسنختار هذا الحل بالرغم من كلفته.



الشكل 57: مotor السيرفو الذكي *AX-12A* المستخدم.

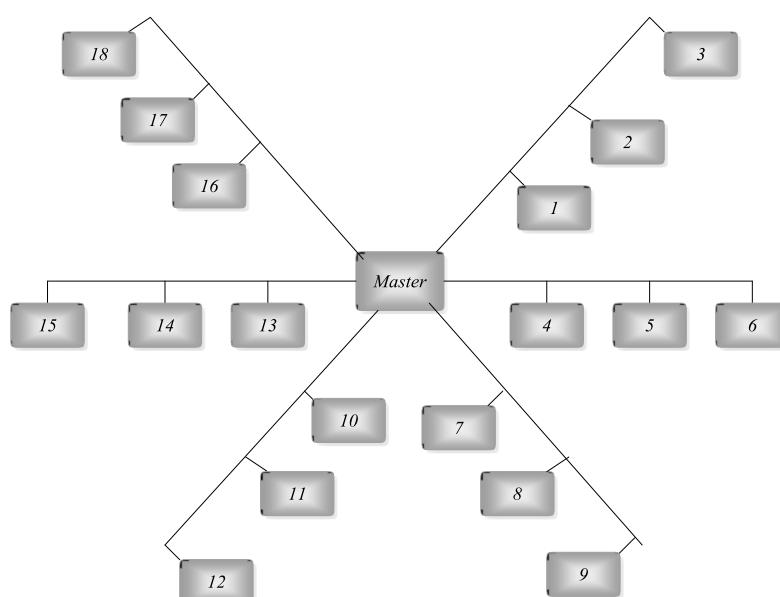
تمتاز هذه المحركات بوجود تغذية راجعة للموضع والسرعة الزاوية والجهد والحرارة والحمل، كما أنه يمكن التحكم بالموضع والسرعة والعزم الأعظمي والاستجابة. يمكن التحكم بالموقع بتجزئية 0.29° (خطوة 1024) ضمن المجال $[0, 300^{\circ}]$. التخاطب مع المحركات شبكي

(بسرعة $1Mbps$) ويوجد لكل محرك معرف (*ID*) خاص به قابل للتعديل وبالتالي طريقة التوصيل الكهربائي تسلسلية كما يبين (الشكل 58). للmotor ثلاثة خطوط (*VDD, GND, Data*) حيث أن التغذية المحبذة للمحرك $11.1V$.



الشكل 58: مداخل المحرك وطريقة التوصيل التسلسلية لعدة محركات.

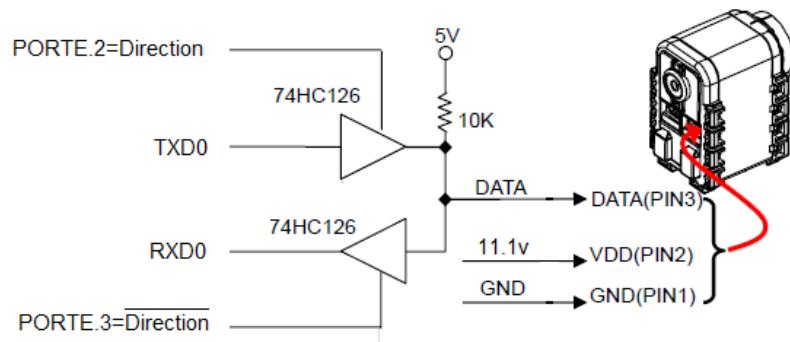
أما بالنسبة لطريقة التوصيل المستخدمة في هذا المشروع فهي نجمية كما يبين (الشكل 59)، لأنه من غير الممكن التوصيل التسلسلي لكافة المحركات، وبالتالي هذه الطريقة سوف تسهل التوصيل الكهربائي (كل فرع ثلاثة محركات). يتم أيضاً عزل الضجيج مقارنة بالتوصيل التسلسلي لكافة المحركات معاً.



الشكل 59: طريقة التوصيل الشبكية النجمية المستخدمة بين الدارة الرئيسية (*Master*) والمحركات (*slave*).

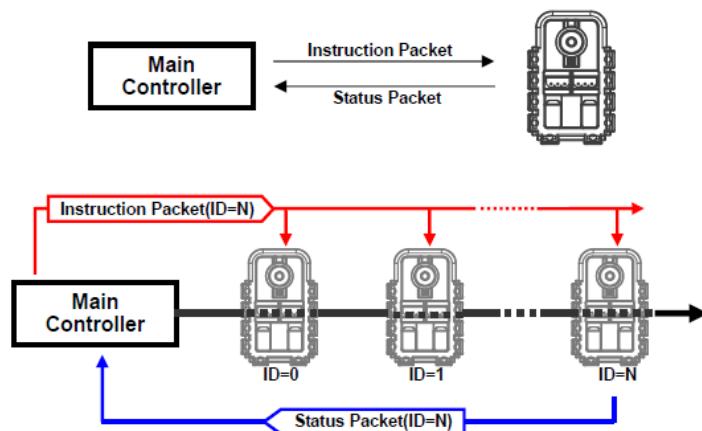
6-4. التخاطب مع المركبات

كما تحدّثنا سابقاً أن بروتوكول التخاطب *Half duplex* لذلك نحتاج للتوصيل مع USART الخاصة بالمحكم الصغرى Atmega128 الدارة المبينة في (الشكل 60) والتي تتيح تغيير اتجاه المعطيات إما إرسال للmotor أو استقبال منه.



الشكل 60: دارة تأمين التراسل Half Duplex بين المحرك والمتحكم الصغرى.

يتم إرسال ما يسمى بحزمة المعطيات (Instruction Packet) للمحركات واستقبال ما يسمى بحزمة الحالة (Status Packet) كما مبين في (الشكل 61) وبحسب المعرف الخاص بكل محرك يتم هذا التراسل، حيث يتم إرسال الحزمة إلى كافة المحركات.



الشكل 61: طريقة التخاطب إرسال ثم استقبال حزمة تعليمات وحزمة معطيات، حيث يتم إرسال حزمة التعليمات إلى كافة الوحدات المتصلة ويتم التلقّي بحسب المعرف الخاص بالمحرك. يتم إرسال حزمة الحالة من قبل الوحدة مباشرة بعد تلقّي الحزمة السابقة.

يتم إرسال حزمة العطيات (Instruction Packet) للمحرك كما مبينة في (الشكل 62) حيث تتضمن:

.(Header) 0xFF 0xFF: بداية إطار المطبيات أو ID: المعرف الخاص بالوحدة (يمكن التخاطب مع 254 محرك). Length: طول المطبيات (عدد البارامترات + 2). Instruction: التعليمة التي يجب على المحرك أن ينفذها وهي مبينة في الملحق(A). Parameter1...N: البارامترات اللازمة لتنفيذ تعليمات معينة. Check Sum: يتضمن العلاقة التالية:

$$\text{Check Sum} = \sim(\text{ID} + \text{Length} + \text{Instruction} + \text{Parameter1} + \dots + \text{ParameterN})$$

نذكر مثلاً للإرسال الموضع والسرعة لمحرك ذو معرف ID=0 المزاوية 180° وبسرعة زاوية 57rpm. التعليمة تكون Write_Data=0x03 المبينة في جدول التعليمات في الملحق (A)، العنوان = 0x1E وهو عنوان الموضع المراد الذهاب إليه الموجود في RAM الخاص بالمحرك. يتم تحويل الموضع والسرعة لتصبح مكتوبة على 2Byte لتناسب 1024 تجزئية، أي Speed =0x0200، position=0x0200 يصبح الإطار كما يلي:

FF FF 00 07 03 1E 00 02 00 02 D3

Instruction Packet

0xFF	0xFF	ID	LENGTH	INSTRUCTION	PARAMETER1	...	PARAMETER N	CHECK SUM
------	------	----	--------	-------------	------------	-----	-------------	-----------

Status Packet

0xFF	0xFF	ID	LENGTH	ERROR	PARAMETER1	PARAMETER2	...	PARAMETER N	CHECK SUM
------	------	----	--------	-------	------------	------------	-----	-------------	-----------

الشكل 62: شكل إطار المطبيات المرسل للمحرك (Instruction Packet) والمستقبل من المحرك (Status Packet).

أما بالنسبة لحزمة الحالة (Status Packet) يتم إرسالها من قبل المحرك تلقائياً بعد إرسال حزمة تعليمات، ومضمونها Error Byte والذي يدل على حالة الوحدة (حيث يرمز كل بت من هذا البایت إلى خطأ معين). يمكن أن تتضمن حزمة الحالة الموضع الحالي أو السرعة الحالية....إلخ وأيضاً يتم إرسالها بعد إرسال حزمة تعليمات معينة.

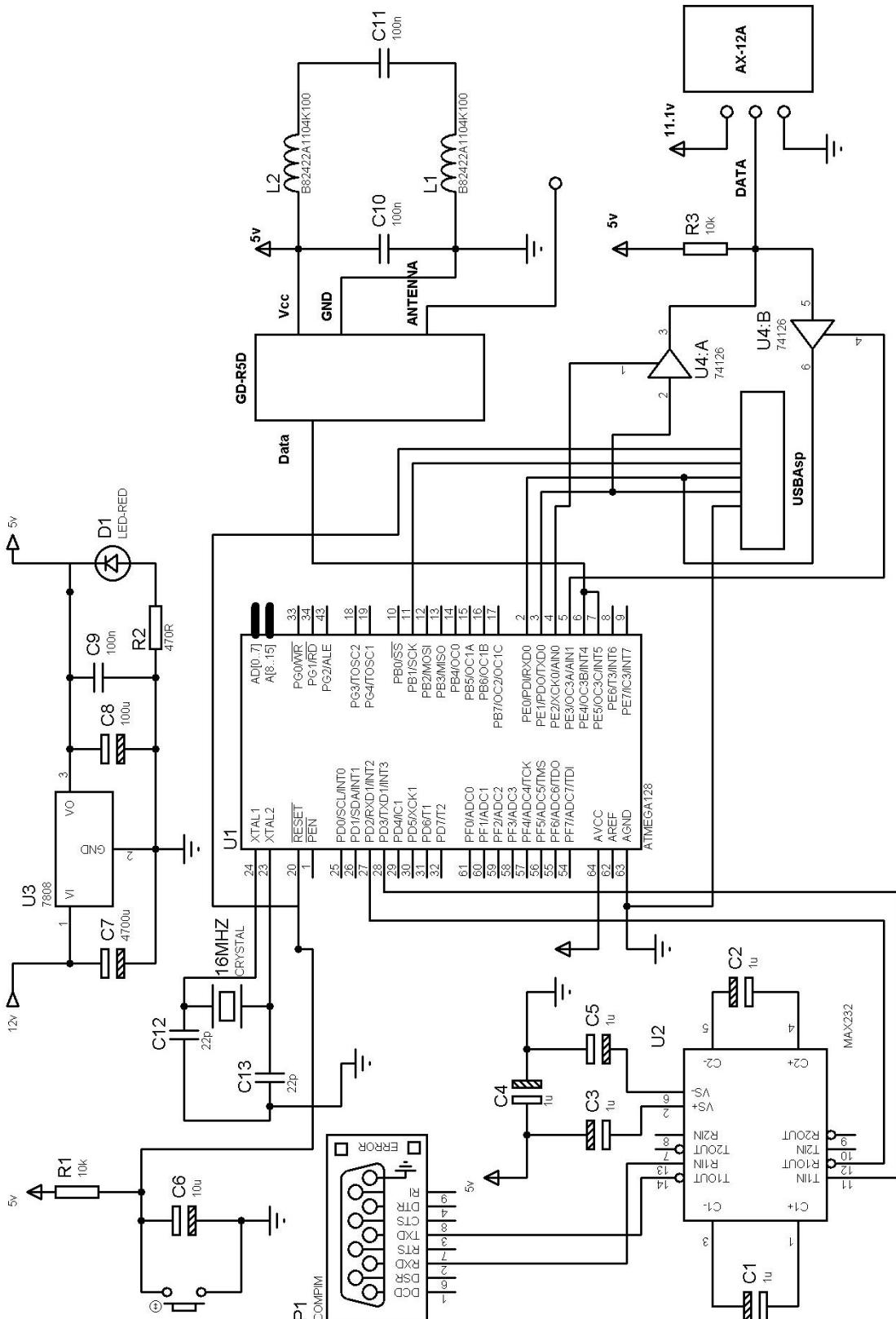
للتحكم بعدد من المحركات في نفس الوقت (مع تزامن) يتم استخدام التعليمة Instruction=SYNC_WRITE كما مبينة في جدول التعليمات في الملحق (A). يتم استخدام Broadcasting ID=0xFE في هذا الإطار لأنه غير مخصص لمحرك واحد، حيث يتم إرسال

هذا الإطار من المعطيات لكافة المحركات المتصلة وبحسب المعرف الخاص المبين في (الشكل .(63

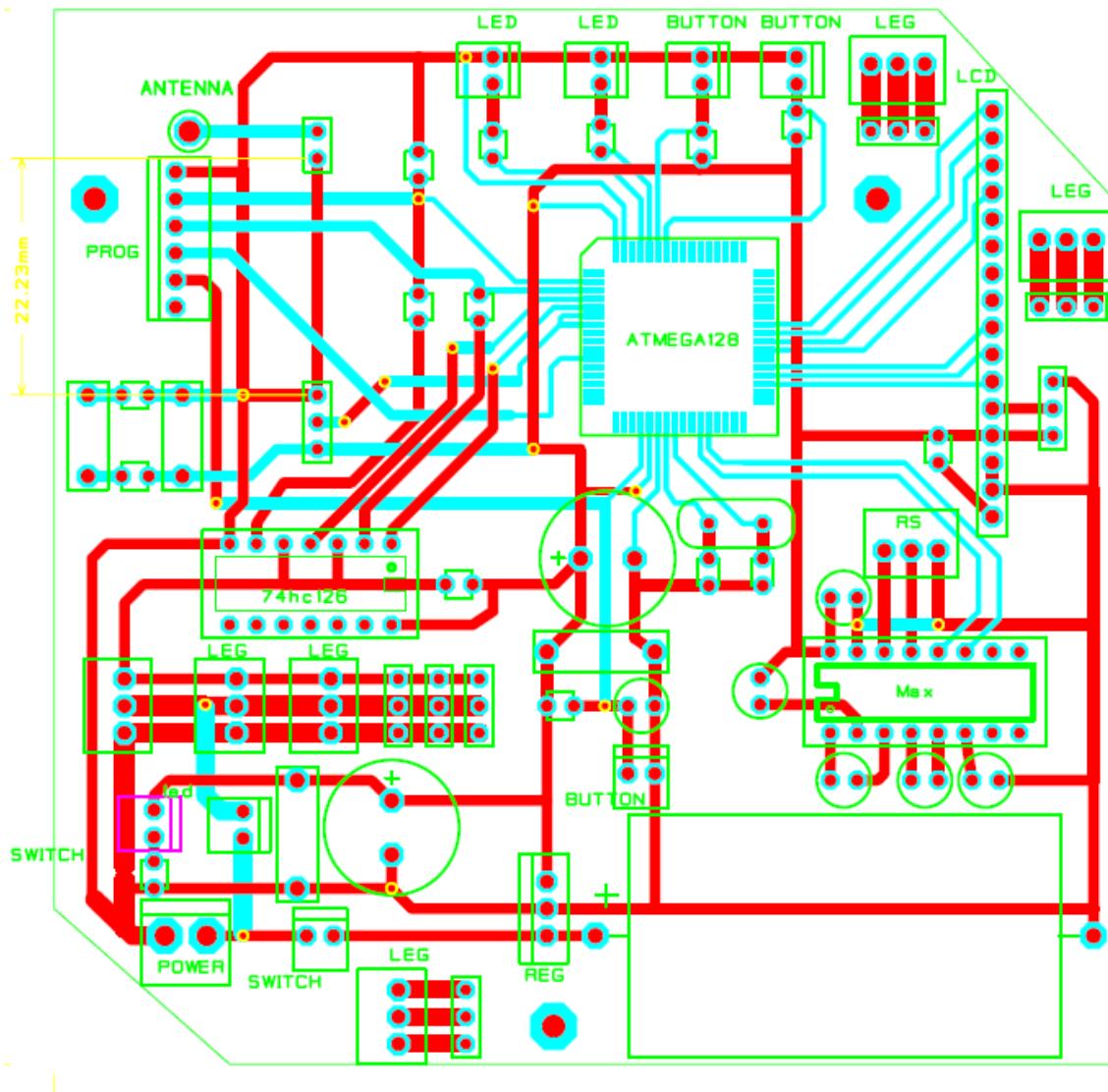
ID	0XFE
Length	$(L + 1) * N + 4$ (L: Data length for each Dynamixel actuator, N: The number of Dynamixel actuators)
Instruction	0X83
Parameter1	Starting address of the location where the data is to be written
Parameter2	The length of the data to be written (L)
Parameter3	The ID of the 1st Dynamixel actuator
Parameter4	The 1st data for the 1st Dynamixel actuator
Parameter5	The 2nd data for the 1st Dynamixel actuator
...	
Parameter L+3	The Lth data for the 1st Dynamixel actuator
Parameter L+4	The ID of the 2nd Dynamixel actuator
Parameter L+5	The 1st data for the 2nd Dynamixel actuator
Parameter L+6	The 2nd data for the 2nd Dynamixel actuator
...	
Parameter 2L+4	The Lth data for the 2nd Dynamixel actuator
....	

الشكل 63: مضمون حزمة التعليمات المرسلة لكافة المحركات المتصلة باستخدام الـ **SYNC_WRITE**

يبين (الشكل 64) مخطط الدارة الرئيسية والشكل (الشكل 65) مخطط الدارة المطبوعة.



الشكل 64: مخطط الدارة الرئيسية باستخدام برنامج 7 Proteus



الشكل 65: مخطط الدارة المطبوعة للدارة الرئيسية باستخدام برنامج CADSTAR.

7-4. التحكم اللاسلكي

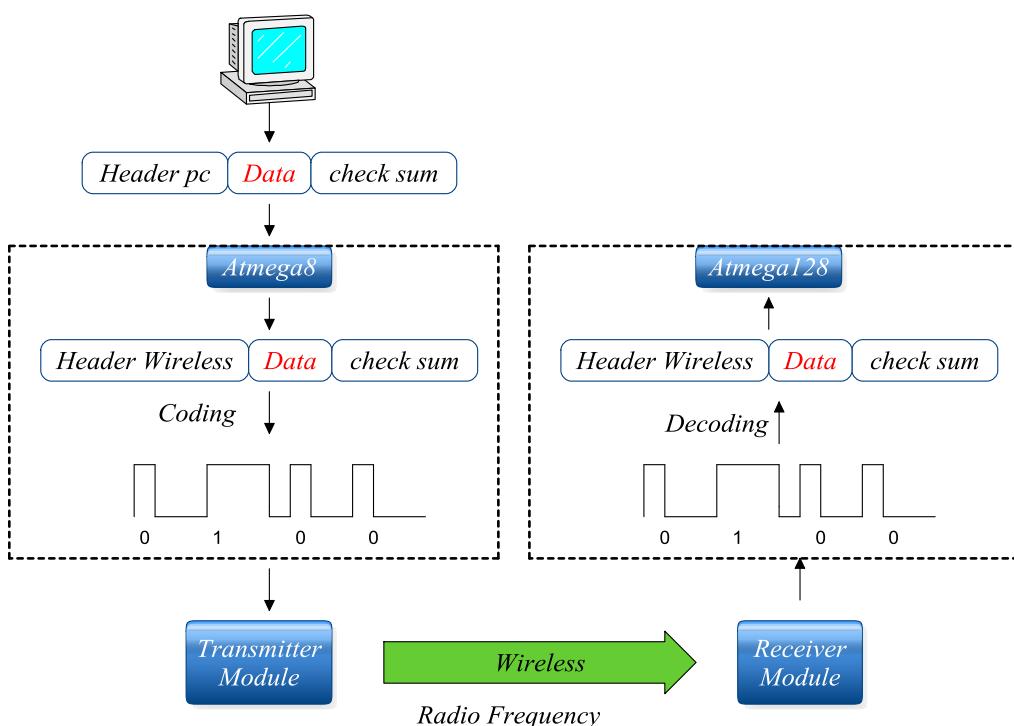
بحسب المخطط الصنديقي (الشكل 49) سيتم اعتماد طريقة إرسال الأوامر عن طريق الحاسب ثم إلى دارة الإرسال ليتم استقبالها من قبل دارة الاستقبال الموجودة ضمن الدارة الرئيسية في الروبوت. تتألف دارة التحكم اللاسلكي من معالج Atmega8 ودارة استقبال تسلسلية من الحاسب، دارة إرسال كما مبين في الشكل (الشكل 66). لإرسال المعطيات لاسلكياً سوف نستخدم الوحدتين المتواقتين (*RF module*) المزودة من وحدة الإرسال (GD-TX6) المتواقة مع وحدة الاستقبال (GD-R5D). تعتمد وحدة الإرسال المبدأ ASK (إرسال '1' عن طريق إشارة ذات مطال مرتفع، وإرسال '0' عن طريق إشارة ذات مطال منخفض).



الشكل 66: المخطط الصنوفى لدارة الإرسال اللاسلكى.

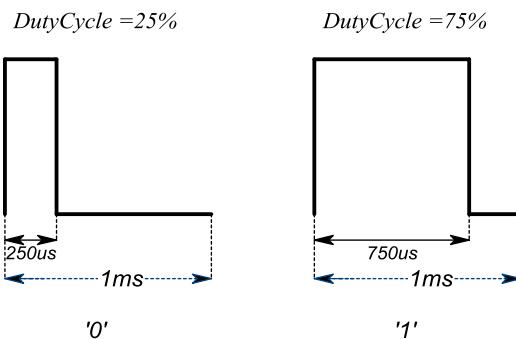
1-7-4. بروتوكول التخاطب اللاسلكى

من أجل تحصين التخاطب اللاسلكى من الضجيج يجب وضع بروتوكول مناسب. كما مبين في (الشكل 67) يتم استقبال المعطيات من الحاسوب ($Data=1\text{ byte}$) إلى المتحكم الصغرى ليتم تغليفها في إطار معطيات مؤلف من ترويسة 1 byte ومعطيات و $check\ sum=1\text{ byte}$. بعدها يتم ترميز البيانات بإشارة PWM بحيث يقابل كل بت إشارة عرضها $1ms$. يتم بعدها إرسالها لوحدة الإرسال ليتم نقلها لاسلكياً إلى وحدة الاستقبال.



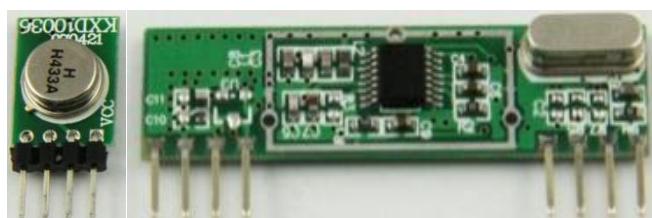
الشكل 67: يبين كيفية انتقال المعطيات (1 byte) من الحاسب الرئيسي إلى الدارة الرئيسية (دارة الروبوت). في حال كان البت '1'، ترسل إشارة PWM ذات $dutyCycle = 0.75$ ذات 0.75 ms ، أما في حال البت '0'، فترسل إشارة PWM ذات $dutyCycle = 0.25$ (الشكل 68). باستخدام مؤقت وموارد نبضات PWM يتم الترميز وذلك بتغيير عرض نبضة PWM عند كل مقاطعة ($timer\ overflow$) - أي عند انتهاء كل دور إشارة. تكرر العملية السابقة من أجل كل بت من الإطار حتى نهايته، وبعدها يتم

إرسال '1' دائمًا. تقييد هذه العملية في مقاومة الضجيج أي في حالة عدم إرسال أي معلومات يتم إرسال '1' بشكل متكرر.



الشكل 68: طريقة الترميز المتتابعة لـ إرسال اللاسلكي.

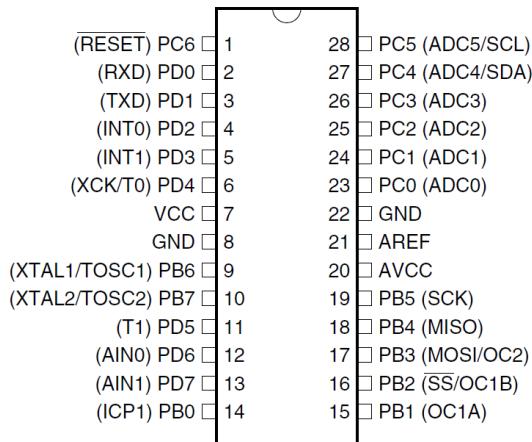
عند الاستقبال يتم إدخال الإشارة إلى مدخل مقاطعة خارجية (ضمن الدارة الرئيسية Atmega128). باستخدام مقاطعني الجبهة الصاعدة والهابطة وباستخدام مؤقت، يتم تصفير المؤقت عند الجبهة الصاعدة، وعند الجبهة الهابطة يتم قراءة قيمة هذا المؤقت. وبالتالي نحصل على عرض النسبة المستقبلة، وبمقارنتها بقيمة معينة (المتوسط) نحصل إما على صفر أو واحد. بذلك يستطيع المتحكم الصغير قراءة الإطار كاملاً والتحقق من صحته ليتم بعدهاأخذ المعلومات وتنفيذ التعليمية المقابلة. يبين (الشكل 69) وحدتي الإرسال والاستقبال المستخدمتين.



الشكل 69: يبين وحدة الاستقبال إلى اليمين (GD-R5D)، ووحدة الإرسال إلى اليسار(GD-TX6)

4-7-2. اختيار المتحكم الصغير لدارة التحكم اللاسلكي

تم اختيار المتحكم الصغير Atmega8 (الشكل 70) للحاجة لمخرج PWM وإمكانية التخاطب التسلسلي مع الحاسب إضافة لوجود المؤقتات لتوليد إطار المعلومات وإرساله لوحدة الإرسال. بشكل رئيسي يتم إرسال معلومات عن طريق إطار من الحاسب إلى دارة الإرسال ليتم تفكيكها وأخذ المعلومات ثم تغليف هذه المعلومات مرة أخرى في إطار من أجل الإرسال اللاسلكي.



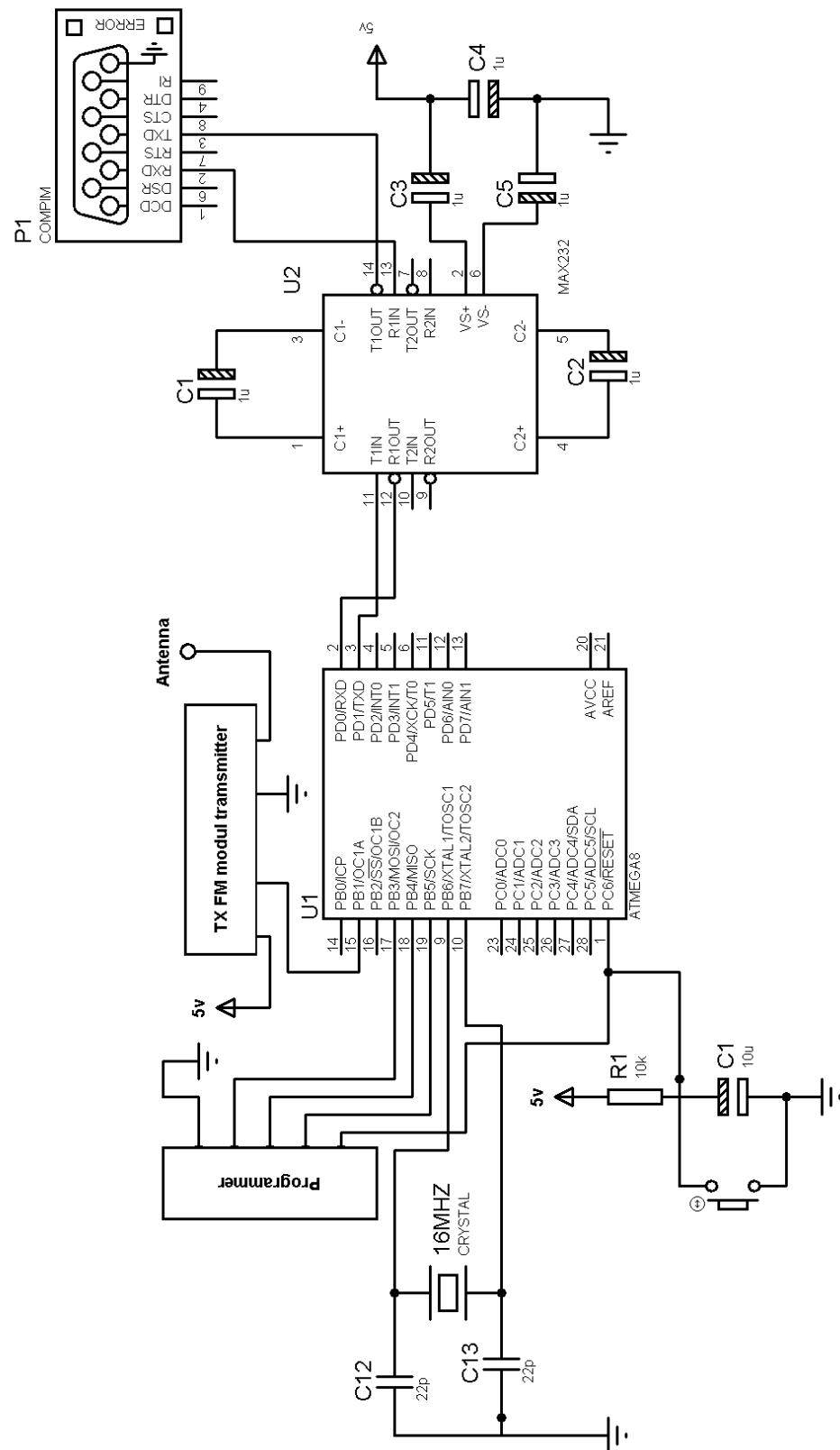
الشكل 70: يبين مداخل المعالج *Atmega8* من النشرة الفنية.

سرعة إرسال الإطارات من الدارة اللاسلكية هو $24ms$ ذلك لأن تردد إشارة *PWM* التي تحمل المعلومات هي $1kHz$ ، وبالتالي $1ms$ من أجل كل بت وبما أن لدينا $24bit$ يكون زمن الإرسال $24ms$. أما بالنسبة لزمن الإرسال من الحاسب للدارة اللاسلكية فهو مهملاً أمام هذه القيمة. وبالتالي يصبح زمن الإرسال الكلي بشكل تقريري $24ms$ وهو صغير مقارنة بنمط عمل الروبوت (دور حركة المشي $500ms$).

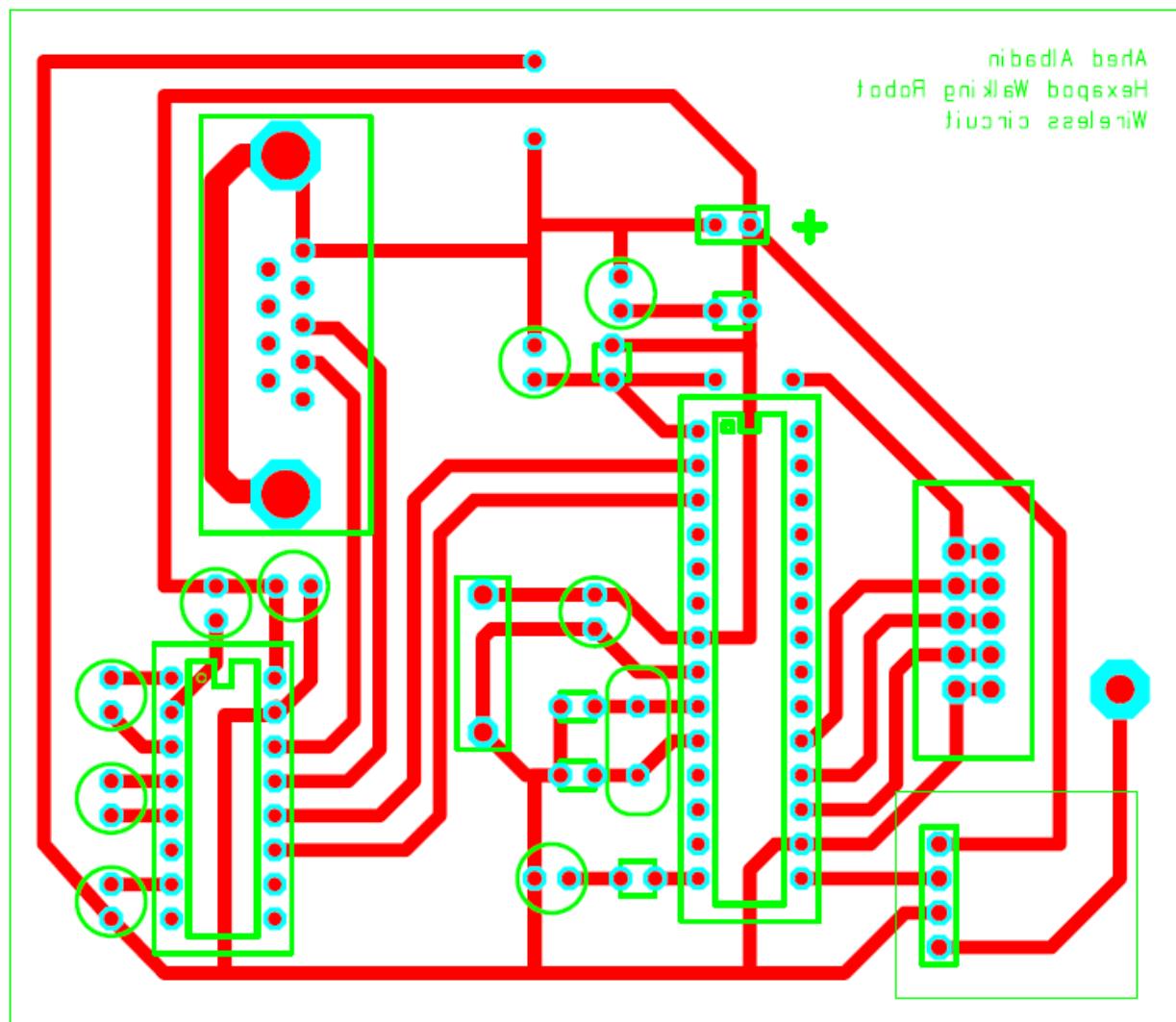
3-7-4. التغذية والاتصال مع الحاسب

يتم تغذية الدارة السابقة من تغذية *USB*. يضاف أيضاً دارة *MAX232* لتكييف جهد دارة *RS232* مع جهد المعالج.

يبين (الشكل 71) مخطط دارة الإرسال ويبيّن (الشكل 72) مخطط الدارة المطبوعة لها.



الشكل 71: مخطط دارة الإرسال.



الشكل 72: مخطط الدارة المطبوعة لدارة الإسال.

الفصل الخامس

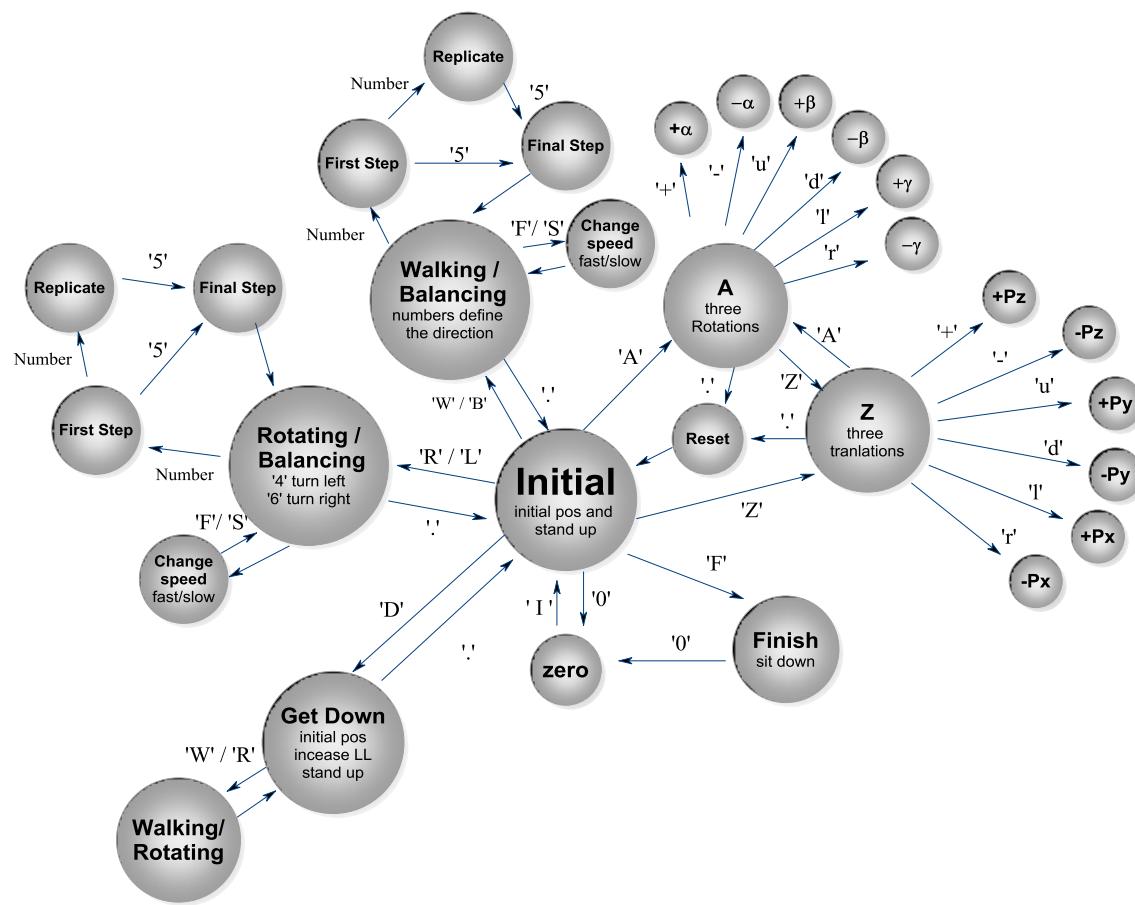
الجزء البرمجي

1-5 - مقدمة

يتضمن هذا الجزء برمجة الحسابات الرياضية لكافة النماذج الهندسية المحسوبة سابقاً، وبالتالي برمجة المسارات الرياضية وتنفيذ بروفيل السرعة الموضع. يتم ذلك عن طريق حساب النموذج العكسي وبالتالي حساب زوايا المحركات والسرعات الزاوية وإرسالها خلال دور تقطيع معين. تم إنشاء توابع بلغة C لحساب النماذج الرياضية وللتخطاب مع المحركات (عبر إطار معطيات)، وأيضاً توابع لتنفيذ بروتوكول التخاطب اللاسلكي.

2-5 - مخطط الحالة

إن الروبوت هو روبوت متنقل وبالتالي يجب أن يتلقى الأوامر لاسلكياً وينفذ مسارات معينة وحركات بحسب هذه الأوامر. تحتاج هذه العملية لمخطط حالة يتضمن كل الأوامر الممكنة ويبين (الشكل 73) مخطط الحالة الذي تم تنفيذه. في الحالة الإبتدائية لا نعلم بمكان كل محرك أي الوضعية (Zero) يتم بعدها إرسال المحرف 'I' للاستعداد لحركة الوقف ثم الوقف. بعدها يتقرر المخطط لعدد من الحالات منها السير بإرسال 'W'، ثم بعدها يتم إرسال رقم معين يدل على جهة السير ثم إرسال الرقم '5' للوقف. يمكن أيضاً إجراء إنسحابات الثلاثة للجسم والدورانات أيضاً. يتضمن المخطط أيضاً حالة الدوران وهي مشابه لحركة المشي كما يمكن أيضاً السير باستخدام نمط الأرضي الوعرة.

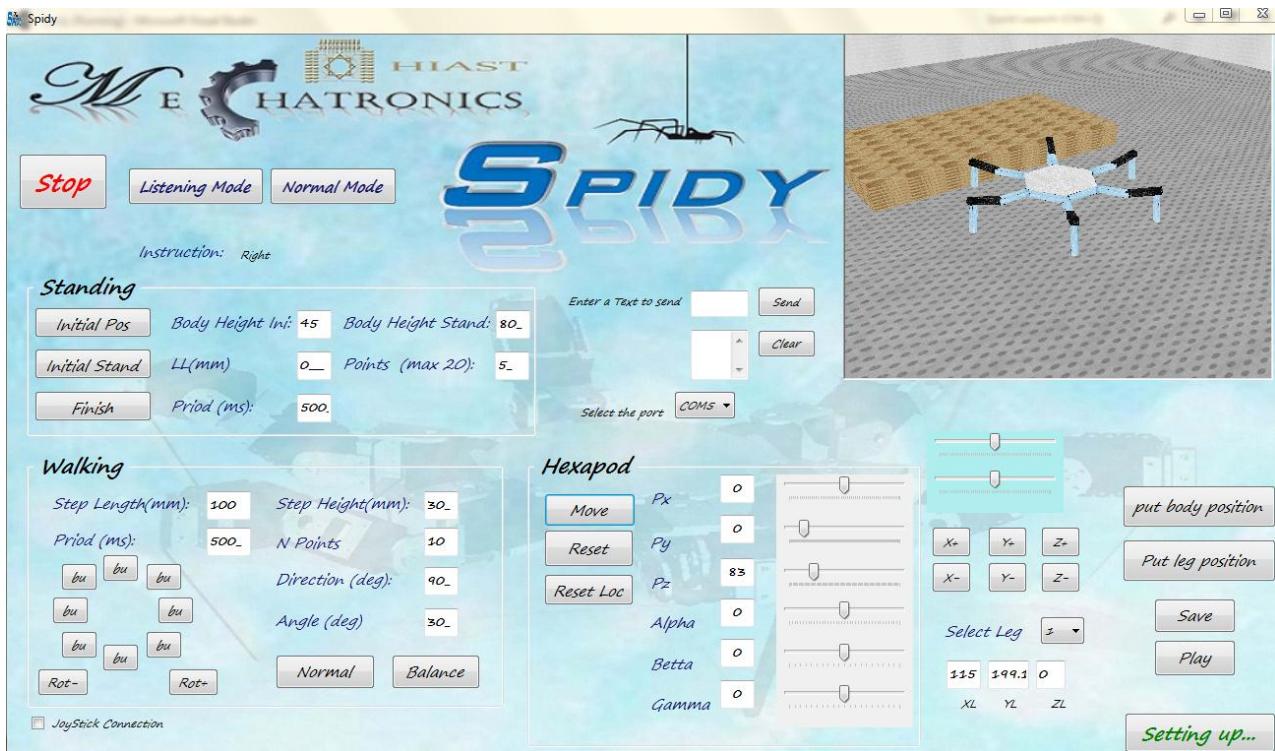


الشكل 73: مخطط الحالة للبرنامج.

5-3. الواجهة التخطيبية والمحاكاة (OpenTK)

في الوضعية الطبيعية يتلقى الروبوت الأوامر لاسلكياً، ولكن يمكن اتصال الدارة الرئيسية عبر منفذ Serial وإرسال الأوامر نفسها.

قمنا ببناء واجهة تخطابية تمكنا من إرسال تلك الأوامر، لكن توجد وضعية أخرى للدار
الرئيسية وهي وضعية التنصت. وبالتالي يتلقى المعالج إطار المعلومات الذي يحتوي على زوايا
الحركات والسرعات الزاوية المحسوبة من قبل الحاسب. حيث تم كتابة التوابع الحركة أيضاً بلغة
C#، ويبين (الشكل 74) الواجهة التخطابية التي تم بناؤها. تتضمن الواجهة الحركات التي تحدثنا
عنها سابقاً وتحتوي على محاكاة باستخدام مكتبة OpenTK. يمكن أيضاً تغيير كافة بارامترات
المشي (دور الحركة، ارتفاع الخطوة، مقدار الخطوة، اتجاه السير، عدد نقاط تقطيع المسار).



الشكل 74: الواجهة التخاطبية التي تم بناؤها باستخدام C#.

رسم ثلاثي الأبعاد مع تأمين الدورانات والإنسحابات للأشكال OpenTK تومن المكتبة المرسومة، وبالتالي نستطيع وضع نموذج حركي مشابه للواقع. يمكن من خلال هذه المحاكاة معرفة فضاء العمل حيث يظهر البرنامج إنذار عند الوصول لقيود الميكانيكية.

الأزرار المستخدمة:

Start: يتم فتح البوابة التسلسلية للبدء بالإرسال.

Listening mode: وهي وضعية الاستماع، حيث يتم حساب المعادلات اللازمة للحركة عبر إطار معلومات وإرسالها عبر البوابة التسلسلية ليتم إرسالها للمحركات مباشرة.

Normal mode: الوضعية الطبيعية وفيها يتم إرسال الأوامر الموجودة في مخطط الحالة عبر البوابة التسلسلية على شكل محرف. يتم حساب المعادلات الحركية في هذه الحالة ضمن المتحكم الصغرى.

Initial Pos: يتم من خلاله تصفير مواضع الأرجل للتجهيز لحركة الوقوف يتم اختيار الارتفاع المبدئي للجسم وارتفاع الوقوف. يمكن التحكم بالبعد L_L بعد بين نقطة نهاية الرجل ومسقط جملة الجسم على الأرض.

Initial Stand: يتم عند الضغط على هذا الزر الانطلاق بمسار بسرعة مدعومة من الارتفاع المبدئي والوصول إلى ارتفاع الوقوف بسرعة مدعومة. يتم التحكم أيضاً بزمن الصعود وتجزئية المسار ثم يتم تشكيل أطر المعلومات الازمة للحركة وإرسالها للمتحكم بتنقطيع زمني.

Finish: يعمل بعكس عمل الزر السابق ويستخدم عند الانتهاء من المهمة.
Normal: عند الضغط عليها مرة واحدة تتم عملية السير بالخطوة المبينة بالمرربع النصي، حيث يمكن التحكم أيضاً بارتفاع الرجل في الهواء ودور الحركة والاتجاه والتجزئية. عند الاستمرار بالضغط على الزر تتكر عملية السير.

Balance: نفس الزر السابق ولكن تتم عملية السير بنمط الأرضي الوعرة.
 ست منزلاقات من أجل التحكم بموضع الجسم ذو درجات الحرية الست، تتم المحافظة على هذا الموضع حتى بعد الضغط على الزر **Normal**، يمكن الرجوع للوضع الابتدائي عن طريق الزر **Reset**.

Select Leg: يمكن اختيار رقم الرجل للتحكم بها بشكل منفصل، حيث يتم عبر الأزرار X,Y,Z تغيير إحداثيات نهاية الرجل بالنسبة للجملة المرجعية. يحتفظ البرنامج بموضع نهاية الرجل الجديد ويمكن القيام بعملية السير أو تغيير موضع الجسم معبقاء موضع نهاية الجسم بالنسبة للجملة المرجعية.

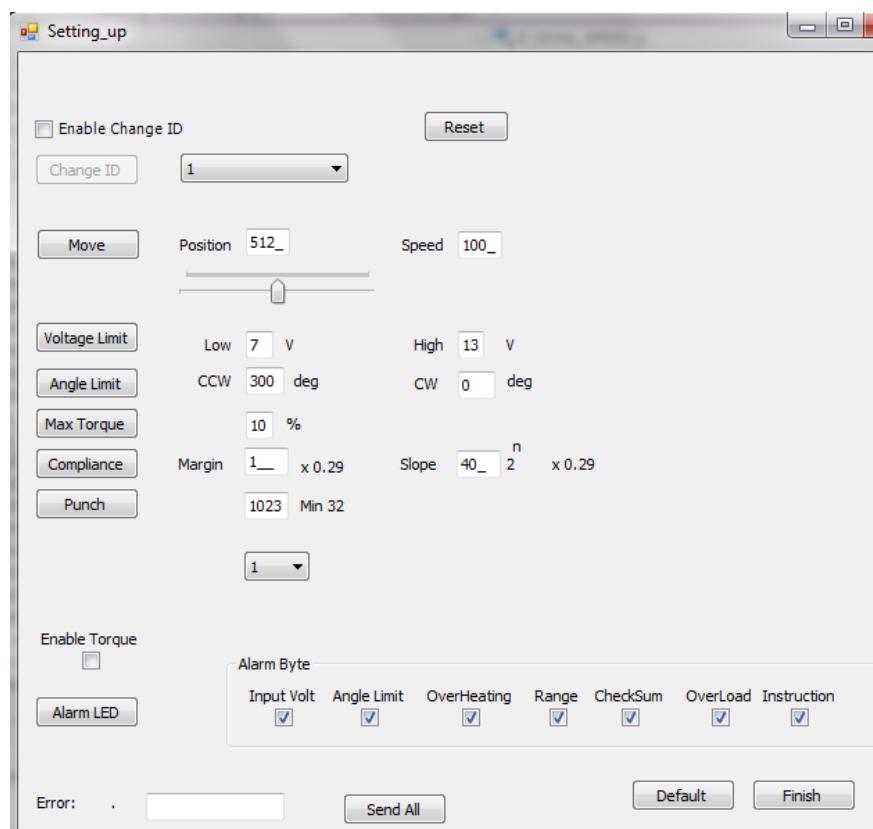
Put Leg Position: عند الضغط على هذا الزر يتم وضع إحداثيات نهاية الرجل في مصفوفة، ذلك بحسب رقم الرجل.

Put Body Position: يتم وضع موضع الجسم الجديد بالنسبة للجملة المرجعية في المصفوفة نفسها.

Save: يتم حفظ المصفوفة السابقة في ملف نصي ليتم استدعائها عند الضغط على الزر **Play** وذلك بتنقطيع زمني معين.

من أجل الحركات المعقدة يمكن تنفيذ حركات معينة لرجل أو لموضع الجسم وحفظ هذه المواقع في ملف نصي، ثم عبر الزر **Play** يمكن إعادة التسجيل السابق.

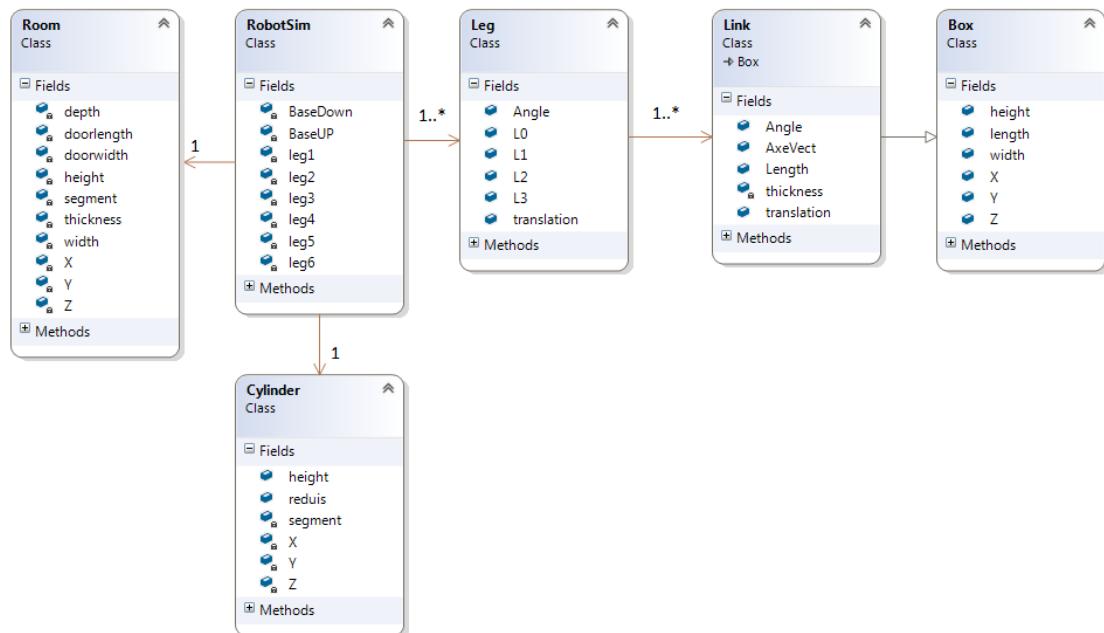
بالضغط على الزر Setting up تظهر واجهة أخرى (الشكل 75) يتم فيها بشكل إساسي ضبط إعدادات أي محرك. يمكن تغيير ID الخاص بالمحرك واختباره، تغيير جهد العمل، القيود الميكانيكية، العزم الأعظمي....الخ.



الشكل 75: الواجهة التخاطبية التي تم بناؤها باستخدام C#، والتي تسمح بـتغيير إعدادات المحرك وتجريبيه. تظهر عند النقر على الزر *setting up* في الواجهة الأساسية.

تم بناء مكتبة خاصة بالمحرك AX-12A وتم بناء التوابع اللازمة لإرسال إطار المعطيات التي يمكن أن تحتوي على أي تعليمية خاصة بالمحرك لتنفيذ مهمة معينة. إضافة إلى المكتبة الخاصة بالروبوت Robot، التي تحتوي على كافة النماذج الهندسية.

بالنسبة لعملية المحاكاة فقد تم بناء صفوف مساعدة لعملية الرسم. يظهر (الشكل 76) مخطط الصفوف، حيث أن الصف Box هو الصف الأب ويرث منه الصف Link، الذي هو عبارة عن صندوق ولكن يميزه محور الدوران والطول (طول الرابطة). الصف Leg عبارة عن سلسلة من Link عددها ثلاثة. أما الصف RobotSim فهو عبارة عن ست أرجل (Leg) وقاعدة Body والتي هي عبارة عن اسطوانة ولكن بتقطيع صغير نسبياً لتظهر القاعدة العلوية والسفلى على شكل مسدس.



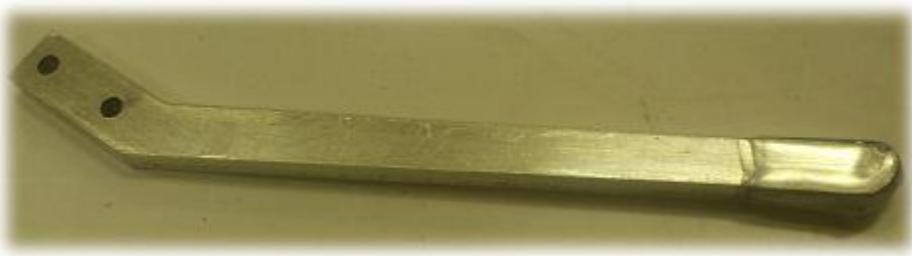
الشكل 76: يبين الشكل مخطط الصفوفة الخاص بعملية المحاكاة.

الفصل السادس

النتائج التجريبية والمناقشة

1- النتائج العملية

تم تصميم الروبوت كاملاً بوزن 2kg بدون بطاريات (وزن البطاريات 150g)، وبأبعاد طولxعرضxارتفاع= $23 \times 64 \times 64 \text{ cm}^3$. قمنا بتغطيس نهاية الأرجل بمادة السيليكون المطاطي لزيادة معامل الاحتكاك مع الأرض كما مبين في (الشكل 77).



الشكل 77: نهاية الرجل المغطسة بمادة السيليكون المطاطي.

بالنسبة للحركات فقط تم التخاطب معها بسرعة 1Mbps باستخدام إطار المعطيات ذو التعليمية Sync-Write التي تتيح التحكم بكلفة الحركات معاً (الموضع والسرعة الزاوية لكل محرك). تمكننا أيضاً من تطبيق بروفايل سرعة وموضع على رجل واحدة أولاً ثم على كافة الأرجل. حيث تم تقطيع بروفايل السرعة بالنسبة لكافة الحركات.

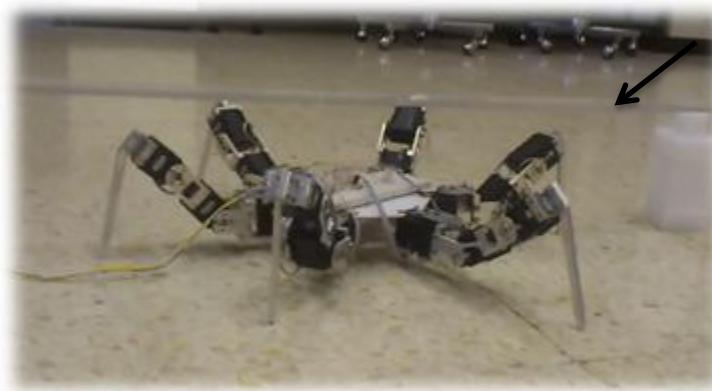
تم تجربة حركة السير بأي اتجاه ويمكن التحكم بطول الخطوة وارتفاعها ودور الحركة أيضاً. حيث بلغ الدور الأعظمي $T=0.5\text{s}$ وبالتالي السرعة الخطية بقياس خطوة 0.1m كانت 0.2m/s. أيضاً من أجل الدوران في المكان (نفس بارامترات السير). مدة استثمار الروبوت هي نصف ساعة تقريباً.

بالنسبة لنمط السير في الأرضي الوعرة فقد تم تنفيذه بنجاح على أرض ترابية ووعرة أيضاً كما يبين (الشكل 78). أكبر ارتفاع يمكن للروبوت الصعود فوقه هو ارتفاع الرجل إضافة إلى الارتفاع المطبق على الجسم كما مبين في الفقرة (3-11-2)، وبالتالي أكبر ارتفاع حصلنا عليه من نتائج المحاكاة هو 75mm.



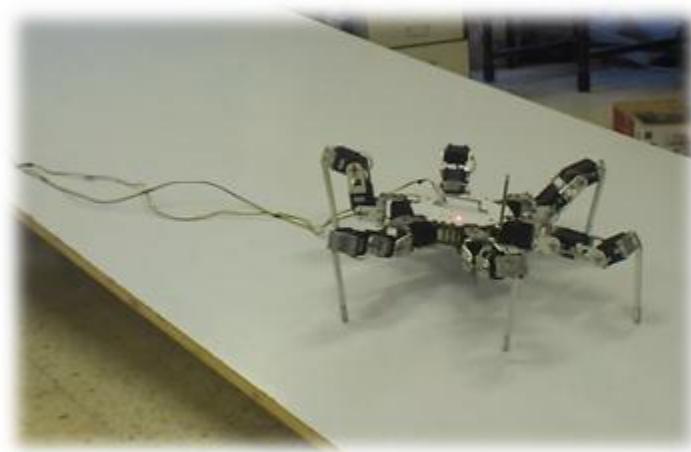
الشكل 78: السير في أرض وعرة غير معروفة باستخدام نمط الأرضي الوعرة.

يستطيع الروبوت النزول تحت عائق فيجب أن تكون المسافة بين نقطة تلامس نهاية الرجل مع الأرض ومركز الجسم أكبر من المسافة المختارة من الدراسة الحركية ($L_L=230$). ثم يتم استخدام نمط السير (3x3)، كان أصغر ارتفاع عائق يمكن النزول تحته (12cm) (الشكل 79).



الشكل 79: النزول تحت عائق ارتفاعه 12cm

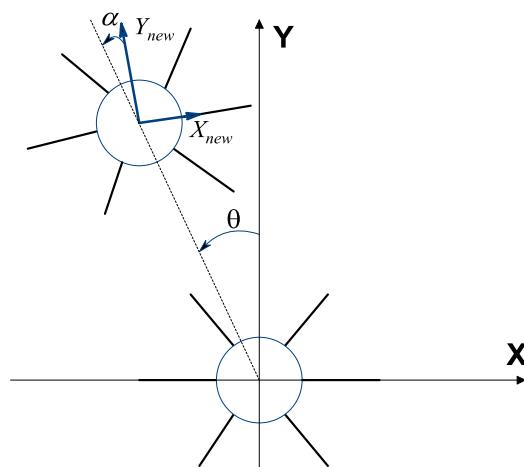
يمكن إجراء انزياح مبدئي للجسم أو إجراء توجيه ثم السير والمحافظة على هذا الانزياح والتوجيه. بهذه العملية يستطيع الروبوت صعود مستوى مائل، حيث يتم نقل مركز العطالة إلى الأمام وتغيير التوجيه لتسهيل عملية الصعود. كما يبين (الشكل 80) تم إجراء الحركة السابقة على مستوى مائل بزاوية 30 درجة.



الشكل 80: صعود مستوى مائل بزاوية 30 درجة، حيث يتم نقل مركز العطالة وتغيير التوجيه أثناء الصعود.

6-2- خطأ التموضع والتوجيه

عند إجراء أمر انسحاب باتجاه معين فإن الروبوت سيذهب للموضع الجديد ولكن بخطأ في الموضع x, y والتوجيه α ضمن المستوى X, Y (كما مبين في (الشكل 81)). لقياس هذا الخطأ نقوم بإجراء تجربة الانتقال لموضع جديد بمسافة $10cm$ بدور حركة $1s$ وبارتفاع خطوة $30cm$ ، وقياس هذا الموضع الجديد وتكرار هذه التجربة عدد معين من المرات فحصلنا على النتائج التالية:

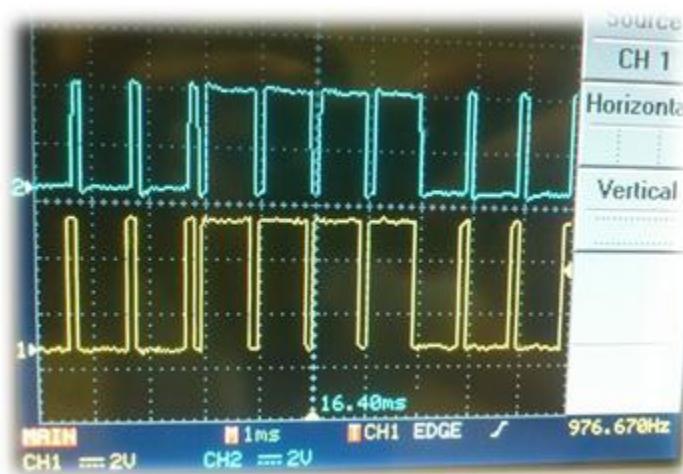


الشكل 81: خطأ التموضع والتوجيه الناتج عن إجراء أمر انسحاب حيث θ اتجاه الحركة.

خطأ تموير الروبوت الأعظمي على المحور X هو 3mm، أما على المحور Y هو 2mm، بالنسبة للتوجيه α (5°). تعود أسباب هذا الخطأ إلى دقة تجزئية الحركة ودقة التجميع الميكانيكي، إضافةً إلى الانزلاق.

6-3. التحكم اللاسلكي

تم تصميم دارة الإرسال كما مبين في الشكل كما تم إرسال إشارة من وحدة الإرسال واستقبال من وحدة الإرسال، ويبيّن (الشكل 82) الإشارة المرسلة والمستقبلة معاً.



الشكل 82: إرسال مجموعة بذات (0001111000) حيث يظهر الإشارة المرسلة في الأسفل والمستقبلة في الأعلى.

تم إرسال إطار معطيات كما تحدثنا في الفقرة (1-7-4) من الحاسب إلى دارة الإرسال ثم إلى الدارة الرئيسية ليتم تفكيك الإطار وأخذ المعلومات التي تمكن الروبوت من تنفيذ أمر معين.

إن تردد الإشارة الحاملة للمعطيات 400MHz بحسب النشرة الفنية لوحدة الإرسال. وبالتالي يكون طول الموجة $m = \lambda / 4 = 0.75m$. وبالتالي طول الهوائي يكون من رتبة ربع طول الموجة أي $0.75/4 = 19cm$.

6-4. الجزء البرمجي

تم بناء التوابع الرياضية التي تسمح بحساب كافة النماذج الهندسية ولحساب المسارات اللازمة لحركة السير والدوران... إلخ. تم نقل هذه التوابع من لغة C# إلى لغة C الخاصة بالمعالج Atmega128.

زمن المعالجة اللازم لحساب النموذج العكسي لكافة المحركات (الموضع والسرعة الزاوية) وتشكيل إطار المعطيات هو 100ms، ذلك من أجل نقطة واحدة من المسار. وبالتالي يصبح زمن المعالجة من أجل كافة نقاط المسار (10 نقاط) هو 1s. إن زمن المعالجة الكبير لا يسمح بحساب نقطة من المسار ثم إرسالها مباشرةً ذلك لأننا نحتاج لدور تقطيع (50ms من أجل سرعة خطية 0.2m/s). وبالتالي يجب تخزين هذه النقاط (المواضع والسرع الزاوية) في مصفوفة ثم إرسال محتوياتها بدور تقطيع معين.

تم تحقيق أمتلية الكود بتقصير زمن المعالجة، ذلك عبر استخدام توابع لحساب \sin, \cos بدون استخدام مكتبة $Math.h$ (استخدام منشور تايلور بدقة ثلاثة مراتب بعد الفاصلة)، مما يجعل زمن حساب \cos أو \sin يساوي 160us. وتم استخدام متحولات int بدلاً من $float$ وبالتالي أصبح زمن المعالجة الكلي 800ms.

بالرغم من هذه الأمتلية يبقى زمن المعالجة كبير نسبياً وبالتالي نحتاج لمتحكم صغرى مختلف مثل (ARM).

5-6-نتائج المحاكاة باستخدام Open.Tk

كما تحدثنا سابقاً أنه تم بناء برنامج محاكاة بلغة C# يمكننا من محاكاة أي حركة وبالزمن الحقيقي. يمكن بهذا البرنامج أن يكشف الوصول لقيود الميكانيكية أي حدود فضاء العمل. وبالتالي نستطيع تجريب الحركة وتغيير البارامترات قبل تجربتها عملياً.

توصينا للنتائج التالية:

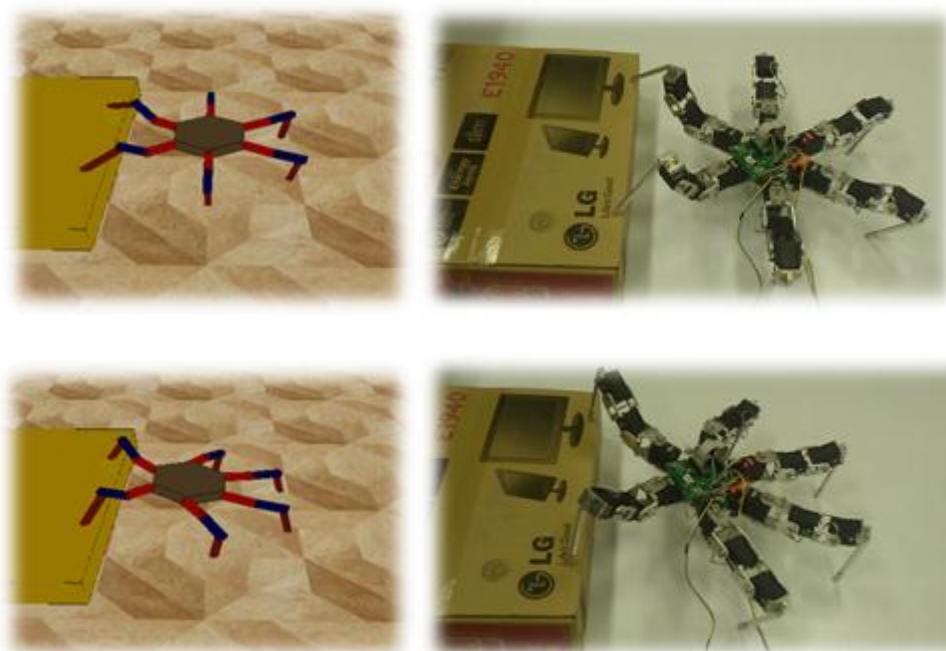
خطوة السير الأعظمية 10cm، خطوة الدوران الأعظمية 50° ، ارتفاع الخطوة 30cm، ارتفاع الخطوة في نمط الأرضي الوعرة $10cm = 4+6$ ، تجزئية المسار 10 نقط.

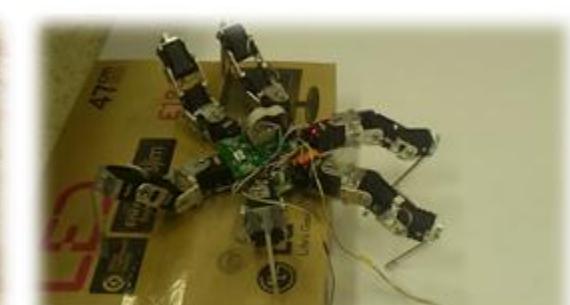
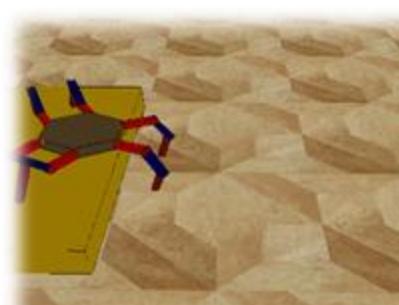
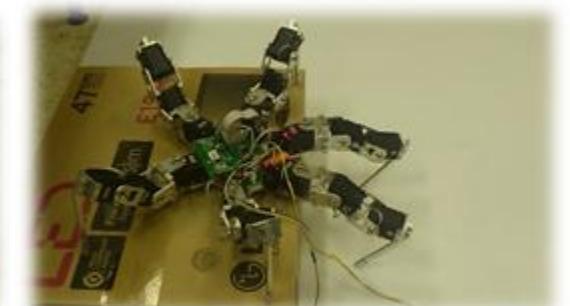
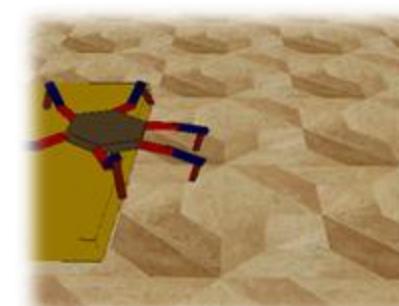
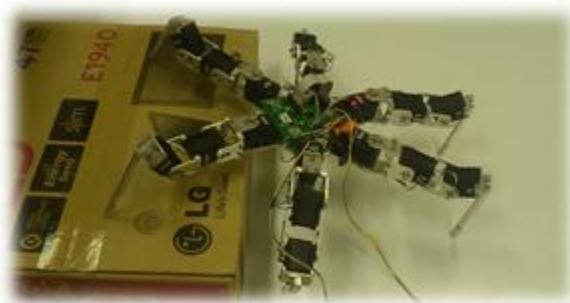
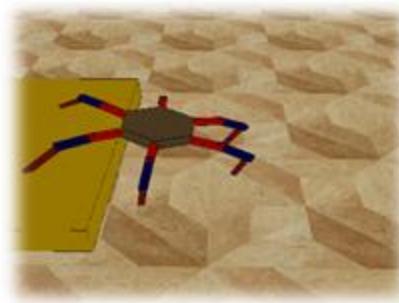
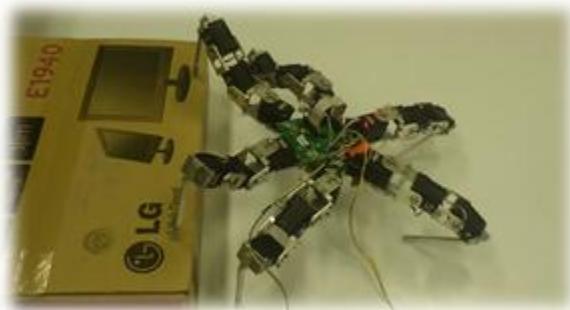
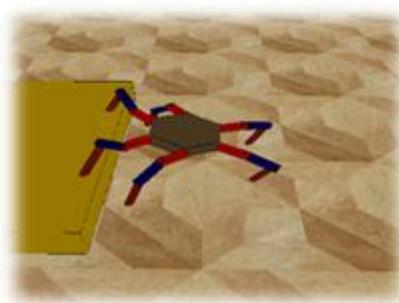
أما بالنسبة لدور الحركة فيتعلق بالسرعة الأعظمية للحركات وقد كان 0.35s، لكن دور الحركة هذا يؤدي إلى سحب تيار أكبر من قدرة البطارية (4A). لذلك توصينا لدور حركة 0.4s ضمن قدرة البطاريات.

6- صعود عقبة معرفة

يتطلب صعود عقبة استخدام النموذج الهندسي المعمم المبين سابقاً، حيث يمكن بهذا النموذج نقل نقطة نهاية الرجل في الفضاء (X, Y, Z) ضمن حدود فضاء العمل، ثم إجراء انسحاب أو دوران للجسم. قمنا بإجراء محاكاة لعملية صعود العقبة بهذا النموذج ثم قمنا بتطبيقها عملياً على عقبة ارتفاعها 12cm .

خوارزمية الصعود مبنية في (الشكل 83). يتم أولاً رفع الأرجل الإثنين المقابلتين للعقبة (1,6) ثم إجراء توجيه للجسم ثم انسحاب للأمام والأعلى. مع الأخذ بعين الاعتبار أن يكون مركز الجسم ضمن منطقة التوازن المتغيرة في كل عملية نقل. يتم بعدها عملية نقل الجسم للأمام بشكل متكرر ونقل الأرجل للأمام. الأرجل (2,5) يتم رفعها فوق العقبة أيضاً ثم يتم تكرار الانحسابات للجسم، إلى نهاية الحركة التي تتطلب نقل الأرجل الأخير (3,4) ثم إعادة توجيه الجسم للوضعية الابتدائية.







الشكل 83: خوارزمية صعود عقبة نظرياً وعملياً.

الخاتمة والآفاق المستقبلية:

تمكننا بنجاح من استقراء أحد أهم المشاريع العالمية في المخابر البحثية لروبوتات المناطق الوعرة وتم تنفيذ الدراسة النظرية وال تصاميم اللازمة لذلك. بعدها وضعت خطط التشغيل للقطع الإفرادية والاحتياجات الازمة للقطع الظاهرة. تم تنفيذ دارة التحكم الرئيسية ودارة الإرسال اللاسلكي، مع إجراء كافة الحركات التي تمكنه من السير في أي اتجاه والدوران، ثم تنفيذ نمط السير في الأرضي الوعرة مع كيفية صعود ونزول مستوى مائل بزاوية 30° ، إلى أن ننتهي بخوارزمية صعود عقبة معرفة.

واجه هذا العمل صعوبات كثيرة تم التغلب عليها بشكل هندسي بحيث نحقق متطلبات دفتر الشروط الوظيفية. هذا العمل يعتبر فاتحة لأعمال مستقبلية تطويرية من الناحية الميكانيكية الحركية الديناميكية والتحكم.

المشروع قابل للتطوير من ناحية الملاحة باستخدام الرؤية. يمكن إضافة حساسات لمس عند نهاية الأرجل تمكنه من كشف الوصول للعقبة، أضف إلى ذلك، قابلية اكتشاف ارتفاع العائق المرتفع نسبياً وتطبيق خوارزمية الصعود بشكل ذاتي.

نشجع على القيام بمشاريع مشتركة بين كافة الإختصاصات، مثل الروبوتات المسيرة آملين فائدة الجميع والوطن وشكراً.

المراجع

- [01] Ding, X. (2010). Locomotion analysis of hexapod robot. Beihang University *Dr.sdf. (2008). evidence.*
- [02] Gasparetto, A. (2008). *Attaching mechanisms and strategies by the spiders'leg.* Italy: University of Udine.
- [03] Woering, I. R. (2011). *simulating the "first steps" of a walking hexapod robot.* Technische Unibersiteit Eindhoven.
- [04] د. عبدالله حوريه. (2013). الروبوتات 1+2. دمشق: المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا.

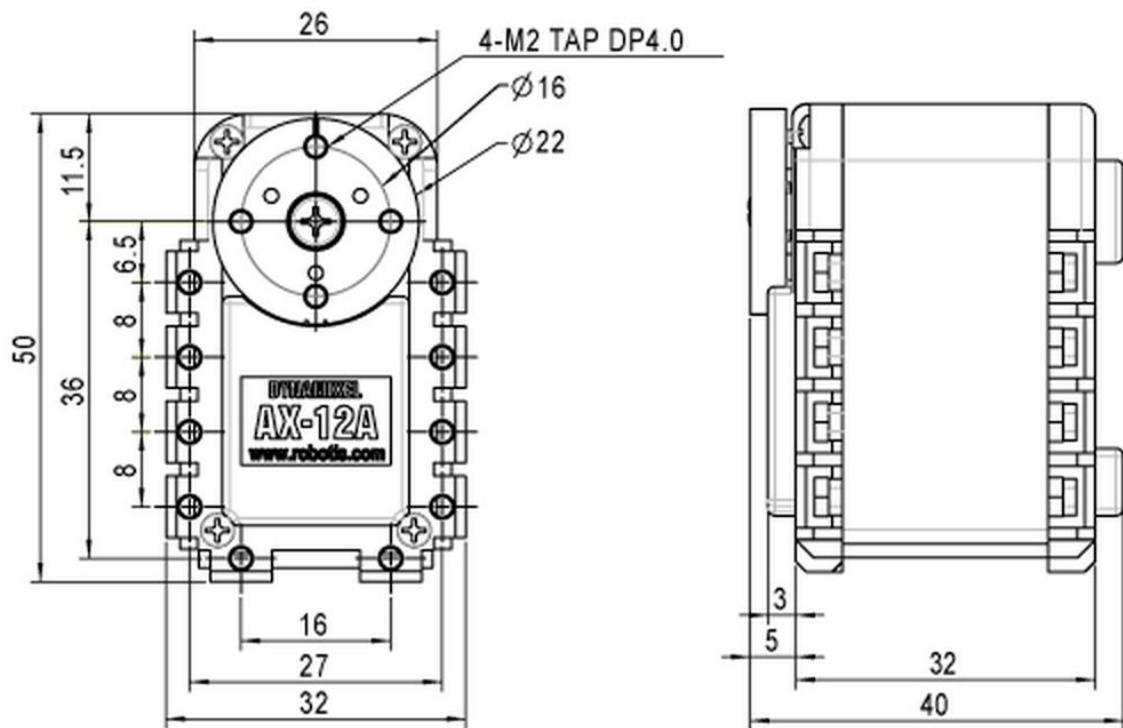
المحتوى

الملحق (أ) النشرة الفنية للمحرك المستخدم AX-12A

المواصفات

- Weight : 53.5g (AX-12/AX-12+), 54.6g (AX-12A)
- Dimension : 32mm * 50mm * 40mm
- Resolution : 0.29°
- Gear Reduction Ratio : 254 : 1
- Stall Torque : 1.5N.m (at 12.0V, 1.5A)
- No load speed : 59rpm (at 12V)
- Running Degree
 - 0° ~ 300°
 - Endless Turn
- Running Temperature : -5°C ~ +70°C
- Voltage : 9 ~ 12V (Recommended Voltage 11.1V)
- Command Signal : Digital Packet
- Protocol Type : Half duplex Asynchronous Serial Communication (8bit,1stop,No Parity)
- Link (Physical) : TTL Level Multi Drop (daisy chain type Connector)
- ID : 254 ID (0~253)
- Communication Speed : 7343bps ~ 1 Mbps
- Feedback : Position, Temperature, Load, Input Voltage, etc.
- Material : Engineering Plastic

أبعاد المحرك



B

جدول التحكم الخاص بالمحرك

Control Table

Address	Item	Access	Initial Value
0(0X00)	Model Number(L)	RD	12(0x0C)
1(0X01)	Model Number(H)	RD	0(0x00)
2(0X02)	Version of Firmware	RD	?
3(0X03)	ID	RD,WR	1(0x01)
4(0X04)	Baud Rate	RD,WR	1(0x01)
5(0X05)	Return Delay Time	RD,WR	250(0xFA)
6(0X06)	CW Angle Limit(L)	RD,WR	0(0x00)
7(0X07)	CW Angle Limit(H)	RD,WR	0(0x00)
8(0X08)	CCW Angle Limit(L)	RD,WR	255(0xFF)
9(0X09)	CCW Angle Limit(H)	RD,WR	3(0x03)
10(0x0A)	(Reserved)	-	0(0x00)
11(0X0B)	the Highest Limit Temperature	RD,WR	85(0x55)
12(0X0C)	the Lowest Limit Voltage	RD,WR	60(0X3C)
13(0X0D)	the Highest Limit Voltage	RD,WR	190(0xBE)
14(0X0E)	Max Torque(L)	RD,WR	255(0xFF)
15(0X0F)	Max Torque(H)	RD,WR	3(0x03)
16(0X10)	Status Return Level	RD,WR	2(0x02)
17(0X11)	Alarm LED	RD,WR	4(0x04)
18(0X12)	Alarm Shutdown	RD,WR	4(0x04)
19(0X13)	(Reserved)	RD,WR	0(0x00)
20(0X14)	Down Calibration(L)	RD	?
21(0X15)	Down Calibration(H)	RD	?
22(0X16)	Up Calibration(L)	RD	?
23(0X17)	Up Calibration(H)	RD	?
24(0X18)	Torque Enable	RD,WR	0(0x00)
25(0X19)	LED	RD,WR	0(0x00)
26(0X1A)	CW Compliance Margin	RD,WR	0(0x00)
27(0X1B)	CCW Compliance Margin	RD,WR	0(0x00)
28(0X1C)	CW Compliance Slope	RD,WR	32(0x20)
29(0X1D)	CCW Compliance Slope	RD,WR	32(0x20)
30(0X1E)	Goal Position(L)	RD,WR	[Addr36]value
31(0X1F)	Goal Position(H)	RD,WR	[Addr37]value
32(0X20)	Moving Speed(L)	RD,WR	0
33(0X21)	Moving Speed(H)	RD,WR	0
34(0X22)	Torque Limit(L)	RD,WR	[Addr14] value
35(0X23)	Torque Limit(H)	RD,WR	[Addr15] value
36(0X24)	Present Position(L)	RD	?
37(0X25)	Present Position(H)	RD	?
38(0X26)	Present Speed(L)	RD	?
39(0X27)	Present Speed(H)	RD	?
40(0X28)	Present Load(L)	RD	?
41(0X29)	Present Load(H)	RD	?
42(0X2A)	Present Voltage	RD	?
43(0X2B)	Present Temperature	RD	?
44(0X2C)	Registered Instruction	RD,WR	0(0x00)
45(0X2D)	(Reserved)	-	0(0x00)
46[0xE]	Moving	RD	0(0x00)
47[0xF]	Lock	RD,WR	0(0x00)
48[0x30]	Punch(L)	RD,WR	32(0x20)
49[0x31]	Punch(H)	RD,WR	0(0x00)

جدول التعليمات الخاصة بالمحرك Instruction Table

Instruction	Function	Value	Number of Parameter
PING	No action. Used for obtaining a Status Packet	0x01	0
READ DATA	Reading values in the Control Table	0x02	2
WRITE DATA	Writing values to the Control Table	0x03	2 ~
REG WRITE	Similar to WRITE_DATA, but stays in standby mode until the ACTION instruction is given	0x04	2 ~
ACTION	Triggers the action registered by the REG_WRITE instruction	0x05	0
RESET	Changes the control table values of the Dynamixel actuator to the Factory Default Value settings	0x06	0
SYNC WRITE	Used for controlling many Dynamixel actuators at the same time	0x83	4~

تنمية النشرة http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/ax_series/dxl_ax_actuator.htm

الملحق (ب) الدارات الإلكترونية

النشرة الفنية لوحدة الاستقبال

Specification for GD-R5D Receive Module

GD-R5D is a super-heterodyne high quality receive module with VHF/UHF and wireless transmitting. The module is based upon market's feedback and a lot of customers' advice. It's shocked in the electronic products market. The module adopts LSI circuit with hi-frequency and low-noise which import from famous company of Europe. It has strong anti-static protection, high reliability and competitive price. It's widely used in remote garage door, auto-gates as retract type, GSM/GPS system, factory automatic, communication and security system etc.

Characteristic as follows :

- (1) The sensibility up to -110dbm; The receiving distance is twice of others'.
- (2) It has reasonable receiving band width, excellent ability of suppress coordinate frequency, strong anti-jamming, it can adapt to kinds of condition.
- (3) It has excellent ability of suppress assemble or scatter radiation, easy pass kinds of instrument.
- (4) Due to excellent shield ,it can adapt kinds of installing environment, consistency is nicer.
- (5) It has ability to restrain the radiation, can worked with several module (one transmitting module with several receiving module), and have no interference to each other, and don't influence the receiving distance.
- (6) Adopting the SAW, the capability is immobile, and the temperature range is wide.
- (7) Frequency range is 250—450 MHz, easy to adjust.
- (8) Use microprocessor directly to link, transmitting speed is up to 20kbps.
- (9) Enhance the anti-jamming ability from the mobile telephone, improve decoding waveform.
- (10) Frequency : 433 / 315MHz.



Electronic specifications :

Parameter	Symbol	Condition	Reference data			Units
			Min	Standard	Max	
Operating frequency	Fc		315	433.92		MHz
Modulate mode			ASK			
Receiving sensitivity		50 Ohm antenna directly input BER3/1000 , 1.2kbps	-107		110	dbm
Most input unsaturated power				-10	0	dbm
Receiving band width			±120		±1000	KHz
Receiving unlock time	Ton				10	ms
Power source consumption	IRC	RX-EN=LOW			6.5	mA
Decoding output high-tension			4.5			V
Decoding output low-tension					0.5	V
Operating temperature	TC		-40		+80	°C

GD-R5D is a remote receive module which adopt ASK transmit mode, due to the width of data signal pulse will change or

remove when it transmit, should make disposal as hereinafter in programming :

when it receive decoding, if high power lever less than 500us, can define "1"



The coding of lead can adopt "1" or "0", the coding of incept can adopt 2ms low power lever.



if high power lever exceed 500us, can define "0"

Utmost rating sheet :

Parameter	Symbol	Data	Units
DC	Vcc-Vss	6.5	V
Operating temperature range	TOPR	-40to85	°C
Storage temperature range	TSTG	-60to125	°C

Pin functions :

Pin	Name	Function
1	ANT	The juncture of antenna
2,3	GND	Grounding
4	RX-DATA	Decoding data output
5	VCC	Supply power

Order information : GD-R5D - XV -XXXXX -X

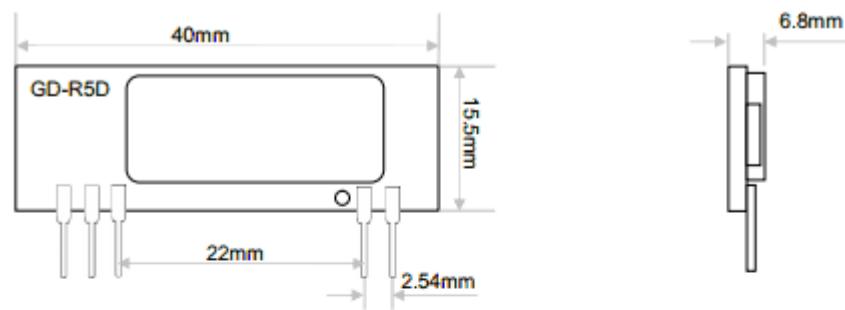
1 2 3 4

- 1 . The module's type
- 2 . Operating voltage --- (5V)
- 3 . Operating frequency --- (150---450MHz)
- 4 . Frequency's precision : A : ±75KHz B : ±250KHz

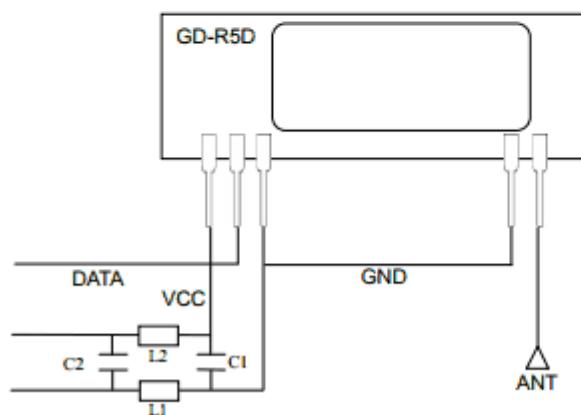
Remarks :

- (1) Offer the correct voltage, error is ±5%.
- (2) It must have one capacitor (0.01uF) between (3) pin and (5) pin.
- (3) If the system has prodigious interaction or high demand, L1,L2(L1=L2=100uh),(C1,C2=0.1uF) can reduce the interaction for the system; if it's opposite,L1,L2,C2 may leave out.
- (4) Antenna has strong influence upon receiving effect, so had better use the antenna which is 1/4 wavelength.
- (5) Antenna's location also has influence upon receiving effect, so had better put the antenna away from the place where have shield object, high voltage and disturbance.

Shapes and dimensions :



Pin wiring diagram:



GD-TX6 Transmitter Module Technologic Specification

The main features :

1. working Voltage, 3V-12V.
2. Using SAW(+75KHZ) , steady working temperature.
3. High transmitting power , matching receiver module of GD-R2 , the range can reach 30-100 meters.
4. High transmitting power , matching receiver module of GD-R5 , the range can reach 500 meters.

Electric Parameters :

VOD-VSS-12V , TA=25°C			GD-TX6 (3-12V) 433.92MHZ			Unit	
parameters	Denotation	states	Reference Value				
			The least	Usual	The most		
Working Frequency	Fc		315	433.92		MHz	
Modulating Mode			ASK				
Transmitting Frequency		9V\50Ω		13DBM		dbm	
Modulating Frequency				2.4		KHZ	
Frequency warp	Fc			±75		KHz	
Current	IRC	12V		10	15	mA	
		6V		6			
		3V		3.2			
Voltage	VCC		3V		12V	V	
Working Temperature	TC		-30		80	°C	

The limited value chart :

Parameters	Denotation	Value	unit
Direct current	Vcc-Vss	3~12	V
Working Temperature	TOPR	-40to85	°C
Storage Temperature	TSTG	-60to125	°C

Ports instruction :

Ports	Comment	Description
1	ANT	Antenna enter-point
2	GND	Ground
3	DATA	Data input
4	VCC	Voltage

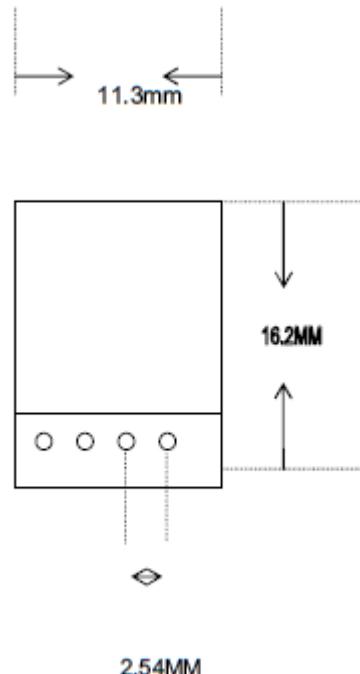
Order information : GDTX6-XV-XXXXX-X

1 2 3 4

- (1) module type
- (2) Working Voltage (5V)
- (3) Frequency (150--450MHz)
- (4) Frequency warp : A : ±75KHz

Notice :

- (1) Vcc voltage and RF module operation voltage should be the same, 15V.
- (2) The antenna must match the module.



الملحق (ج) الرسوم التجميعية والإفرادية.