

الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم النظم الإلكترونية والميكانيكية

ماجستير الروبوتิก

السنة الدراسية

2019-2018

دراسة تصميمية وتحكمية لروبوت ثنائي الأرجل

Design and Control Study of a Biped Robot

دراسة أعدّت لنيل شهادة الماجستير في نظم التحكم والروبوتيك

اختصاص الروبوتيك

إعداد

م. وليم سليمان

إشراف

د. لمى الحسن

د. شادي بيطار

أيلول 2019

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار .. إلى من علمني العطاء بدون انتظار .. إلى من أحمل أسمه بكل افتخار .. أرجو من الله أن يمد في عمرك لترى ثماراً قد حان قطافها بعد طول انتظار وستبقى
كلماتك نجوم أهتدى بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد
والذي العزيز

إلى ملاكي في الحياة .. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان و التفاني .. إلى بسمة الحياة وسر
الوجود إلى من كان دعائهما سر نجاحي وحنانها بلسم جراحى
أمي الحبيبة

إلى أرواح أصدقائنا وأقاربنا اللاتي شاء الله إلا أن يصطف فيها إلى جواره ..
شهدائنا الأبرار

أخوتي

أختي

أصدقائي

أهدى هذا العمل مع فائق الحب والامتنان

كلمة شكر

بعد رحلة بحث وجهد واجتهاد تكُللت بإنجاز هذا البحث، أَحمد الله عز وجل على نعمه التي منّ بها عليّ فهو العلي القدير.

كما لا يسعني إِلَّا أن أخصّ بأسمى عبارات الشّكر والتقدير الدكتور شادي بيطار والدكتورة لمي الحسن لما قدّماه لي من جهدٍ ونصحٍ خلال إنجاز هذا البحث.

كما أتقدّم بالشكر الجزييل لكلّ من أسهم في تقديم يد العون لإنجاز هذا البحث، إلى الذين كانوا عوناً لي في بحثي هذا ونوراً يضيء الظلمة التي كانت تقف أحياناً في طريقي، إلى من زرعوا التفاؤل في دربي وقدموا لي المساعدات والتسهيلات والمعلومات، فلهم مني كلّ الشّكر.

الملخص

يهدف هذا البحث إلى إجراء دراسة تصميمية وتحكمية للروبوتات ثنائية الأرجل التي تعتمد في حركتها بشكل مباشر على ديناميكتها الداخلي، تساهم هذه الدراسة في زيادة فهم آلية الحركة عند الإنسان إضافةً إلى الاعتماد على نتائجها في بناء نموذج روبوتي حقيقي على أساس سليم في دراسات مستقبلية.

قمنا بدايةً بدراسة طائق النمذجة المحتملة للروبوت ثنائي الأرجل، والمقارنة بين طريقتين في النمذجة؛ تعتمد الأولى على استخدام مكتبة Simscape Multibody ضمن بيئة Matlab، بينما تقوم الطريقة الثانية على النمذجة الديناميكية باستخدام المعادلات الرياضية ليتم استخدام هذه المعادلات في بناء نموذج حاسوبي باستخدام المكالمات الرقمية ضمن بيئة Matlab. اعتماداً على المقارنة بين طريقتي النمذجة، اختربنا طريقة النمذجة باستخدام المعادلات الديناميكية لكونها تعطي مرونة وسرعة في الأداء مما يساعد في خدمة الهدف الموضوع للدراسة. قمنا بعد اختيار طريقة النمذجة بناء نموذج حاسوبي لروبوت ثنائي الأرجل مستوى مكون من سبعة أجسام وبست درجات حرارة لاستخدامه في دراساتنا التالية.

أجرينا دراسة تصميمية بهدف اختيار معاملات التصميم الأمثلية التي تعطي أفضل أداء للروبوتات ثنائية الأرجل غير المفعّلة. تضمّنت الدراسة سبر معاملات الأداء المختلفة للروبوتات ثنائية الأرجل والمقارنة فيما بينها واعتماد مجموعة منها في دراستنا التصميمية. بالاعتماد على الخوارزميات التطورية، توصلنا إلى مجموعة المعاملات التي تعطي الأداء الديناميكي الأفضل للنموذج роботи.

تم أيضاً إجراء دراسة تحكمية للنموذج роботи قيد الدراسة، حيث تم اقتراح خوارزمية للتحكم تدمج بين إيجابيات التحكم بالاعتماد على مولدات النمط المركزية وإيجابيات التحكم غير المفعّل المعتمد على الديناميک الداخلي. تعتبر الخوارزمية المقترحة تطويراً لإجرائية مطروحة مسبقاً من قبل Hunag 2014، حيث ساهم التطوير المقترن في تبسيط هذه الخوارزمية ورفع أدائها من عدة نواحٍ خاصة فيما يتعلق بتنوع أنماط الحركة وآلية الانتقال فيما بينها إضافةً إلى زيادة الاستقرار والصلادة ضد التغيرات في استوائية الأرض التي يتحرك عليها الروبوت.

الكلمات المفتاحية: روبوتات ثنائية الأرجل، المشي الديناميكي غير المفعّل، التصميم الأمثل، خوارزمية عناصر السرب، مولدات النمط المركزية، الاستقرار، الصلادة ضد الاضطراب.

Abstract

In this research, we present a study on the design and the control of biped robots that directly depend on their internal dynamics in movement. This study contributes to the understanding of the human movement, besides, its results can be used in building a biped robot prototype in future studies.

We started by comparing between two modeling methods of the biped robot; the first is based on the use of Simscape Multibody library in Matlab environment, while the second is based on the dynamic modeling using the equations of motion and then building a simulated model using numerical integration in Matlab environment. We chose the modeling using dynamic equations because of its flexibility and its simulation speed and we built a simulated model of a biped robot with seven links and six degrees of freedom to be used in next studies.

Moreover, we carried out a study on the design aimed at selecting the optimal design parameters that give the best walking performance. First, we compared between different performance criteria related to the biped robots in order to select a set of criteria to be used in the optimization process. A procedure of optimization based on the chosen criteria was implemented to determine the optimal mechanical design parameters using evolutionary algorithms. As a result, we obtained a set of design parameters that give an optimal performance of the model.

After that, we proposed a control algorithm that integrates the advantages of the central pattern generators-based control methods and the advantages of the passive dynamic walking. The proposed algorithm is a development of the algorithm presented by Hunag 2014. The proposed development contributed to simplifying the previous algorithm and to increasing its performance in several aspects related to the versatility of walking patterns and the transition ability between them, as well as

increasing the stability and the robustness against changes in the height of the ground that the robot walking on.

Keyword: biped robot, passive dynamic walking, optimal design, particle swarm optimization algorithm, central pattern generators, stability, disturbance rejection.

المحتويات

III.....	الملخص
IV.....	Abstract
VI.....	المحتويات
XI	قائمة الأشكال
XV	قائمة الجداول
XVI	المصطلحات
XVII.....	الاختصارات
XIX.....	مقدمة عامة
1	الفصل الأول : التعريف بالبحث
2	1-1 دوافع البحث.....
2	1-1-1 التطبيقات المرتبطة بالإنسان.....
3	2-1-1 التطبيقات الروبوتية.....
4	2-1 التعريف بالروبوتات ثنائية الأرجل.....
10.....	3-1 مشكلة البحث.....
11.....	4-1 أهداف البحث.....
13.....	5-1 الدراسة المرجعية
13.....	1-5-1 دراسة مرجعية لمعاملات التصميم للروبوتات ثنائية الأرجل المعتمدة على الحلقة الحدية.....13
13.....	2-5-1 دراسة مرجعية لطرائق التحكم بالروبوتات المعتمدة على المبدأ غير الفعال.....

16.....	6-1 الخلاصة
17.....	الفصل الثاني: النمذجة الديناميكية والحركة للروبوتات ثنائية الأرجل غير المفعولة
18.....	1-2 مقدمة
18.....	2-2 نموذج الروبوت البسيط
19.....	2-2-1 توصيف حركة الروبوت
21.....	2-2-2 النمذجة الديناميكية
29.....	3-2-2 النمذجة باستخدام بيئة Simscape Multibody
31.....	4-2-2 مقارنة بين طرفيتي النمذجة
34.....	3-2 النموذج المعتمد على سبعة أجسام وست درجات حرية
35.....	1-3-2 أطوار الحركة
37.....	2-3-2 النمذجة الديناميكية
43.....	3-3-2 تابع الخطوة والنقطة الثابتة
44.....	4-3-2 النمذجة باستخدام بيئة Matlab
47.....	4-2 الخلاصة
48.....	الفصل الثالث: دراسة تصميمية للروبوتات ثنائية الأرجل غير المفعولة
49.....	3-1 مقدمة
49.....	2-3 معاملات الأداء للروبوتات ثنائية الأرجل
50.....	1-2-3 دراسة الاستقرار
62.....	2-2-3 دراسة الكفاءة الطاقية
63.....	3-2-3 التنوع في الحركات

63.....	3-3 دراسة أمثلة التصميم الميكانيكي للروبوتات ثنائية الأرجل غير المفعّلة.
64.....	1-3-3 دراسة مرجعية
65.....	2-3-3 تعريف بالأمثلة الرياضية
66.....	3-3-3 معاملات وقيود التصميم
68.....	4-3-3 تحديد مجال معاملات التصميم
68.....	5-3-3 تحديد إجرائية الأمثلة وتواجد الكلفة المناسبة
70.....	6-3-3 اختيار خوارزمية الأمثلة
72.....	4-3 التطبيق العملي لإجرائية الأمثلة المعتمدة
72.....	1-4-3 أمثلة معاملات الاستقرار والسرعة بتتابع كلفة لكل معامل أداء من أجل دخل طاقي ثابت
77.....	2-4-3 أمثلة معاملات الاستقرار والسرعة بتتابع كلفة وحيد مرتبط بعدة معاملات أداء
79.....	3-4-3 أمثلة الأداء الطاقي للنموذج غير المفعّل عند نقطة عمل إسمية معروفة بتردد وطول خطوة الحركة
80.....	5-3 مناقشة نتائج الدراسة التصميمية للروبوت ثنائي الأرجل بسبعة أجسام
81.....	6-3 الخلاصة
82.....	الفصل الرابع: دراسة التحكم بالروبوتات ثنائية الأرجل القائمة على مبدأ عدم التفعيل
83.....	1-4 مقدمة
83.....	2-4 مولدات النمط المركزية Central Pattern Generators
84.....	3-4 نموذج Huang للتحكم بالروبوتات ثنائية الأرجل القائمة على مبدأ عدم التفعيل
86.....	4-4 النموذج المقترن
86.....	1-4-4 توصيف نموذج التحكم المستخدم

89.....	2-4-4 النموذج الرياضي للمهترات
90.....	3-4-4 معاملات النموذج التحكمي.....
92.....	4-4-4 صياغة مسألة الأمثلة.....
94.....	5-4 خاتمة.....
95.....	الفصل الخامس: النتائج العلمية
96.....	1-5 مقدمة
96.....	2-5 معاملات التصميم الميكانيكي المعتمدة
97.....	3-5 إيجاد المعاملات الأمثلية لخوارزمية التحكم
101	4-5 دراسة النتائج
101	1-4-5 أنماط الحركة
104	2-4-5 التحكم بسرعة الحركة
105.....	3-4-5 دراسة الاستقرار المحلي
106.....	4-4-5 دراسة الاستقرار العام
107	5-4-5 دراسة صلادة النموذج ضد الاضطراب
110	6-4-5 دراسة الأداء الطاقي
112	7-4-5 دراسة أثر معاملات التصميم الميكانيكي على الأداء بعد إضافة خوارزمية التحكم
113	8-4-5 مناقشة النتائج
115	5- الخلاصة
116	الفصل السادس: الخاتمة والأفاق المستقبلية
117	الخاتمة
119	الأفاق المستقبلية

قائمة الأشكال

- الشكل 1-1: نموذج لطرف صناعي سفلي يستخدم النواص بهدف تحسين الأداء [1].....
الشكل 1-2: أمثلة عن الروبوتات البشرية المصنعة لأهداف بحثية.....
الشكل 1-3: أمثلة عن الروبوتات البشرية المصنعة بهدف التسلية.....
الشكل 1-4: مستويات الجسم المتعادلة في الروبوتات البشرية [7].....
الشكل 1-5: روبوت McGeer غير الفعال بأقدام مستقيمة [12].....
الشكل 1-6: روبوت McGeer غير الفعال مع الركبتين [13].....
الشكل 1-7: الروبوت Flamingo مع خوارزمية التحكم الخاصة به [22].....
الشكل 1-8: المفعّل MACCEPA بمحركين والذي يعطي القدرة على التحكم بالعزم والمرنة [23].....
الشكل 1-9: الروبوت Veronica وهو روبوت مستوي بست درجات حرية يتم ضمان الحركة المستوية عن طريق ربطه بقضيب يمنع الحركة في الاتجاه المعامد لاتجاه الحركة [24].....
الشكل 2-1: رسم توضيحي لروبوت مستوي بسيط غير مفعّل مكون من أربعة أجسام وأربع درجات حرية.....
الشكل 2-2: سلوك قدم الإنسان أثناء الحركة [33,34].....
الشكل 2-3: أطوار حركة الروبوت البسيط.....
الشكل 2-4: النموذج الروبوتي البسيط خلال حركته.....
الشكل 2-5: معاملات النموذج البسيط.....
الشكل 2-6: قيم الروايا للنموذج البسيط انطلاقاً من الوضع الابتدائي $[\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2] = [0.1808, -0.2312, -0.27]$ وبميل منحدر بقيمة $\beta = 0.01 rad$
الشكل 2-7: السرع الزاوية لمفصلي الفخذ للنموذج البسيط انطلاقاً من الوضع الابتدائي $[\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2] = [0.1808, -0.2312, -0.27]$ وبميل منحدر بقيمة $\beta = 0.01 rad$

الشكل 2-8: الحلقة الحدية مرسومة في المستوى $[\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]$ انطلاقاً من الوضع الابتدائي	31.....
$\beta = 0.01\text{rad}$ وبميل منحدر بقيمة $0.1808 - 0.2312$	[0.27]
الشكل 2-9: النموذج البسيط في بيئة Simscape Multibody	32.....
الشكل 2-10: مقارنة تغير زاوية الفخذ بين طريقتي التمذجة المعتمدين	33.....
الشكل 2-11: مقارنة السرعة الزاوية للفخذ بين طريقتي التمذجة	34.....
الشكل 2-12: نموذج stribbeck في التحامد	34.....
الشكل 2-13: نموذج الروبوت بسبعة أجسام وست درجات حرية	36.....
الشكل 2-14: تسلسل حركات المشي الممكّنة لنموذج الروبوت بسبعة أجسام	37.....
الشكل 2-15: نموذج الروبوت بسبعة أجسام المعتمد مع الرموز المستخدمة	40.....
الشكل 2-16: المخطط التدفقى للتمذجة الحاسوبية لحركة الروبوت	45.....
الشكل 2-17: حركة نموذج الروبوت بالقيم الإسمية	47.....
الشكل 2-18: تغير زوايا رجلي الروبوت وقدميه خلال خمس خطوات متتالية	47.....
الشكل 2-19: السرع الزاوية لرجلي الروبوت والقدمين خلال خمسة أطوار متتالية	47.....
الشكل 2-20: مسقط الحلقة الحدية للروبوت غير الفعال في المستوى المعرف بزاوية الرجل الأولى وسرعتها	48.....
الشكل 3-1: رسم توضيحي لمفهوم الربط النقطي	53.....
الشكل 3-2: تقسيم مستوى الربط إلى مجموعة خلايا باستخدام خوارزمية Cell Mapping	54.....
الشكل 3-3: منطقة الجذب لنموذج الروبوت البسيط باستخدام خوارزمية GPCM	55.....
الشكل 3-4: المخطط الصندوقي لتابع الخطوة في حالته المستقرة، مع دخل بشكل اضطراب وخرج يمثل الانحراف عن النقطة الثابتة والانحراف عن قيمة موصّف الحركة المختار عند النقطة الثابتة	58.....
الشكل 3-5: مقارنة معايير الاستقرار الموصفة للروبوتات ثنائية الأرجل مع تغير زاوية المنحدر	61.....
الشكل 3-6: منطقة الجذب لنموذج الروبوت البسيط من أجل زوايا ميلان مختلفة لمنحدر الحركة	63.....

الشكل 3-7: نموذج الروبوت المعتمد في عملية الأمثلة من قبل Zang [20]	66
الشكل 3-8: خطوات إيجاد قيمة تابع الكلفة من أجل خوارزمية الأمثلية المستخدمة في إيجاد معاملات النموذج الروبوتي ...	70
الشكل 3-9: نتائج تقارب خوارزمية الأمثلة من أجل تابع الكلفة المرتبط بالاستقرار المحلي.....	75
الشكل 3-10: نتائج تقارب خوارزمية الأمثلة من أجل تابع الكلفة المرتبط بتجاوز العوائق.....	76
الشكل 3-11: نتائج تقارب خوارزمية الأمثلة من أجل تابع الكلفة المرتبط بالاستقرار المحلي.....	77
الشكل 4-1: نموذج Huang للتحكم الثنائي عزم – مرونة باستخدام مولدات النمط المركزية [25]	86
الشكل 4-2: مخطط توضيحي لأنماط المشي الثلاثة المعتمدة في دراسات Huang لبناء نموذج التحكم الثنائي عزم – مرونة باستخدام مولدات النمط المركزية [25]	86
الشكل 4-3: هيكلية نموذج التحكم باستخدام مولدات النمط المركزية المقترن.....	88
الشكل 4-4: هيكلية النموذج العصبي المقترن.....	89
الشكل 4-5: نموذج العصبون المستخدم والمعتمد على نموذج Matsuoka	90
الشكل 5-1: النموذج بست درجات حرية المعتمد. a) درجات الحرية. b) توزع الكتل وعزم العطالة.....	97
الشكل 5-2: مخطط حركة الروبوت من أجل المعاملات الأمثلية للنموذج التحكمي المقترن.....	99
الشكل 5-3: تغيير زوايا رجلي الروبوت وقدميه خلال خمس خطوات متتالية.....	101
الشكل 5-4: السع الزاوية لرجلي الروبوت والقدمين خلال خمس خطوات متتالية.....	101
الشكل 5-5: مسقط الحلقة الحدية للروبوت في المستوى المعرف بزاوية الرجل الأولى وسرعتها، يظهر الشكل النقاط الأساسية من مراحل الحركة.....	102
الشكل 5-6: مجال سرع الحركة بتغيير إشارتي التحكم (u_e, u_s).....	103
الشكل 5-7: تغير طول الخطوة بتغيير إشارتي التحكم (u_e, u_s).....	103
الشكل 5-8: تغير تردد الحركة بتغيير إشارتي التحكم (u_e, u_s).....	104
الشكل 5-9: أنماط المشي كتابع لإشارتي الدخل (u_e, u_s).....	105

- الشكل 5-10: ملاحقة النموذج الروبوتي لبروفيل محدد للسرعة 106
- الشكل 5-11: تغيير طويلة القيمة الذاتية العظمى لمصفوفة اليعقوبى لتابع الخطوة بتغيير إشارتي الدخل (u_e, u_s) 107
- الشكل 5-12: منطقة الجذب للروبوت من أجل إشارتي الدخل $u_e = 2.4, u_s = 22$ 108
- الشكل 5-13: نسبة نجاح الروبوت في تجاوز مسار ياضطراب عشوائي بطولية ϵ مع وبدون الاستراتيجية المقترحة لزيادة الصلادة ضد الاضطراب 110
- الشكل 5-14: الانخفاض الأعظمي في استوائية الأرض الذي يمكن للروبوت تجاوزه مع تغيير إشارتي التحكم (u_e, u_s) بعد تطبيق استراتيجية التحكم المقترحة 111
- الشكل 5-15: الكلفة الميكانيكية للحركة كتابع لإشارتي الدخل (u_e, u_s) 112

قائمة الجداول

الجدول 2-1: القيم العددية المستخدمة في بناء النموذج البسيط.....	27
الجدول 2-2: مقارنة بين أداء النمذجة الديناميكية باستخدام المعادلات الرياضية والنمذجة باستخدام بيئة Simscape	35
الجدول 2-3: معاملات التصميم المستخدمة في حالة نموذج بسبعة أجسام وقيمها الإسمية.....	41
الجدول 3-1: مقارنة معايير الأداء المرتبطة بالاستقرار للروبوتات ثنائية الأرجل.....	61
الجدول 3-2: المعاملات المستخدمة في أمثلة التصميم الميكانيكي لروبوت بسبعة أجسام من قبل Zang [20]	66
جدول 3-3: المجالات المعتمدة لمعاملات التصميم الميكانيكي.....	69
الجدول 3-4: معاملات خوارزمية عناصر السرب المستخدمة في عملية الأمثلة.....	74
الجدول 3-5: نتائج الأمثلة باستخدام تابع كلفة مرتبط بمعامل أداء وحيد.....	76
الجدول 3-6: نتيجة الأمثلة باستخدام تابع كلفة وزن يعطي أهمية أكبر للاستقرار المحلي للروبوت.....	79
الجدول 3-7: نتيجة الأمثلة باستخدام تابع كلفة وزن يعطي أهمية أكبر لسرعة الحركة.....	79
الجدول 4-1: المعاملات التصميمية للنموذج التحكمي مع مجال تغيراتها.....	94
الجدول 5-1: معاملات التصميم المستخدمة وقيمها الإسمية.....	98
الجدول 5-2: معاملات خوارزمية عناصر السرب المستخدمة لإيجاد معاملات النموذج العصبي.....	99
الجدول 5-3: المعاملات التصميمية الأمثلية المعتمدة للنموذج التحكمي المقترن.....	100
الجدول 5-4: معاملات خوارزمية عناصر السرب المستخدمة لإيجاد معاملات الصلادة ضد الاضطراب.....	109
الجدول 5-5: القيم الأمثلية لمعاملات الصلادة ضد الاضطراب.....	110

المصطلحات

English	العربي
Planar biped robot	الروبوت ثنائي الأرجل المستوي
Limit cycle walking	المشي على الحلقة الحدية
Passive dynamic walking	المشي الديناميكي غير المفعل
Passivity-based bipedal walking	المشي ثنائي الأرجل المعتمد على المبدأ غير المفعل
biological-inspired control methods	طرق التحكم القائمة على أساس بيولوجي
Central pattern generators	مولادات النمط المركزية
Stride function	تابع الخطوة
Basin of attraction	منطقة الجذب
Versatility	التنوع في سرع الحركة
Walking patterns	أنماط الحركة
Zero moment point	نقطة انعدام العزوم
Support Polygon	مضلع الدعم
Particle swarm optimization	خوارزمية عناصر السرب الأمثلية
General pattern search	خوارزمية البحث بالأنماط العمومية
Froude number	رقم فرود

الاختصارات

BOA	Basin of attraction
PSO	Particle swarm optimization
GSN	Gait sensitivity norm
CoM	Center of mass
CPG	Central pattern generator
MACCEPA	Mechanically Adjustable Compliance and Controllable Equilibrium Position Actuator
ZMP	Zero moment point
GPS	General pattern search
Fr	Froude number

الرموز

الرمز	التسمية
l	طول الرجل
l_i	طول الجسم i
a_t	نسبة المسافة من مركز عطالة الفخذ إلى مفصل الفخذ إلى طول الفخذ
a_s	نسبة المسافة من مركز عطالة الساق إلى مفصل الركبة إلى طول الساق
a_f	نسبة المسافة من مركز عطالة القدم إلى إصبع القدم إلى طول القدم
l_{ft}	المسافة من مفصل الكاحل إلى إصبع القدم
l_{fh}	المسافة من مفصل الكاحل إلى كعب القدم
m	كتلة الروبوت
m_i	كتلة الجسم i
I_i	مركز عطالة الجسم i
β	زاوية منحدر الحركة
K_{fa}	ثابت صلابة النابض في مفصل الكاحل
K_h	ثابت صلابة النابض في مفصل الخصر
u_i^e, v_i^e	متحولات الحالة للمهتز العصبيوني
$\tilde{\theta}_j$	خرج المهتز العصبيوني (نقطة توازن الرابطة)
\tilde{u}_i^e	إشارة الدخل
$\tau_i^e, \tau_i'^e$	ثوابت زمنية
β^e	معامل التوفيق المتبادل
c_i^e	توزيع لإشارة الدخل
ω_{ij}^e	أوزان التأثير المتبادل بين العصبونات
$Feed_i^e$	إشارات راجعة من الرابطة المتحكم بها تتضمن معلومات عن الوضع الزاوي والسرعة الزاوية

مقدمة عامة

تأتي أهمية فهم دراسة ديناميك حركات المشي على رجلين من التطبيقات المحمولة لهذا النوع من الحركات سواء في المجالات ذات التوجه الإنساني أو المجالات ذات التوجه الروبوتي. تشمل المجالات الإنسانية موضوع الأطراف الصناعية أو الإضافات المساعدة التي تحسن من قدرة البشر على تنفيذ المهام المختلفة، أمّا فيما يخص المجالات الروبوتية فمن الممكن أن تحل الروبوتات ذات الرجلين مكان الإنسان في البيئات الصناعية وللقيام بالأعمال المنزليّة أو لمجرد التسلية.

يمكن أن تدرس حركات المشي من زاويتين مختلفتين؛ الزاوية الأولى هي من خلال تحليل حركات الإنسان ومحاولة فهمها وتفسيرها وهو ما يسمى gait analysis، أمّا التوجه الثاني للدراسة يمكن أن يتم بناء نماذج روبوتية بـرجلين ومحاولة فهم ديناميك حركتها وكيفية التحكم بها وتحريكها للحصول على حركة المشي وهو ما يسمى gait synthesis، ومن ثم نسعى إلى تطوير هذه الحركات لتصبح ذات كفاءة عالية من ناحية الطاقة والصلادة ضد الاضطراب والانتقال بين أنماط مختلفة من حركات المشي تختلف فيما بينها بسرعة الحركة وطول الخطوة. لا شك أنّ بناء نماذج بسيطة ومحاولة تحريكها يسمح بالتركيز على مجموعة من المعاملات التي ترتبط ارتباطاً مباشراً بالحركات، ويساهم بشكل كبير في توجيه الدراسات إلى نقاط محددة والإجابة عن التساؤلات بشكل تدريجي، بينما في حالة تحليل حركات المشي يتطلب الأمر التعامل مع المسألة بكامل تعقيداتها بما تتضمنه من تنوع العضلات والحساسات التي تساهم في أداء الحركات إضافة إلى الجهاز العصبي المعقّد.

لاتزال حركة المشي قيد الدراسة ولا تزال التطبيقات الحقيقية لهذا النمط من الحركات خارج حيز العمل، ولذلك نسعى من خلال هذا العمل إلى الدخول في هذا المجال ومحاولة استيعاب وفهم ديناميك الحركة بدايةً من خلال دراسة الديناميكي الداخلي فقط للنماذج الروبوتية بدون أي تفعيل خارجي وكيفية الاستفادة القصوى من الديناميكي في هذا المجال، ومن ثم محاولة إضافة نموذج تحكمي قادر على استثمار الملاحظات التي حصلنا عليها لتعزيز قدرة النماذج غير المفعّلة على توليد أنماط مختلفة من الحركات وزيادة قدرتها على تجاوز الاضطراب بأداء طافي جيد.

ضمن هذا البحث نعرض في الفصل الأول التعريف بالبحث والدراسة المرجعية، ثم ننتقل في الفصل الثاني إلى بناء النموذج الروبوتي ثنائي الأرجل المعتمد ويتضمن ذلك اختيار طريقة النمذجة المناسبة وهيكليّة الروبوت. يتضمن الفصل الثالث دراسة تصميمية تهدف إلى اختيار معاملات التصميم الميكانيكي الأمثلية للنموذج، ونعرض الدراسة التحكمية في الفصل الرابع والتي تركز على خوارزمية التحكم المقترنة بالاعتماد على مولدات النمط المركزيّة. يحوي الفصل الخامس نتائج تطبيق خوارزمية التحكم المقترنة حيث نقارن أداؤها مع أداء الطراائق المذكورة في الأدب، إضافةً إلى مقارنة الأداء بتغيير معاملات التصميم الميكانيكي للنموذج. نختتم التقرير بملخص عن أهم نتائج البحث والإسهامات المقدمة ومجموعة من الآفاق المستقبلية والتطویرات التي يمكن العمل عليها انطلاقاً من هذا البحث.

الفصل الأول

التعريف بالبحث

نعرض في هذا الفصل تعريفاً بالروبوتات ثنائية الأرجل وبالتطبيقات الحالية والمستقبلية لها، مع تقديم دراسة مرجعية للأبحاث ذات الصلة وصولاً إلى تحديد مشكلة البحث والهدف منه.

1-1 دوافع البحث

الهدف الرئيسي من البحث هو دراسة المبادئ الحاكمة لحركة المشي عند الإنسان وتوطين النماذج المعتمدة في هذا المجال، وهذا الهدف العلمي له العديد من التطبيقات التي يمكن تصنيفها بشكل أساسي ضمن توجهين رئيسيين: الأول باتجاه التطبيقات المرتبطة بشكل مباشر بالإنسان، والثاني باتجاه التطبيقات الروبوتية.

1-1-1 التطبيقات المرتبطة بالإنسان

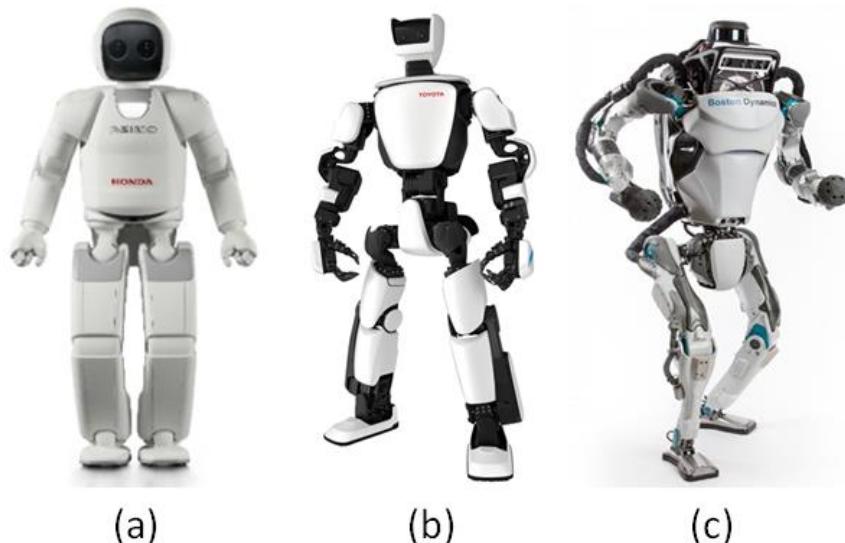
يمكن للدراسات المرتبطة بدراسة وفهم وتقليد حركة الإنسان أن تساهم بشكل مباشر في تطوير الأجهزة التي تساعد في مرحلة إعادة التهيئة للإنسان المصابة (الأجهزة الداعمة) أو الأجهزة التي تحل محل الأطراف المبتورة (الأرجل الصناعية)، فمثلاً دلت العديد من الدراسات على مشابهة أداء مفصل الكاحل في رجل الإنسان لنابض دوري، كما أثبتت دراسات أخرى أن إضافة نوابض مرنة في الكاحل يساهم في تخزين الطاقة الناتجة عن اصطدام الرجل المتحرك بالأرض ويستفاد من هذه الطاقة عند دفع الجسم بالكاحل الخلفي مما يساهم في تقليل الصرف الطيفي مع دعم هذه الحركة بمحرك كهربائي. ساهم تطبيق الملاحظات السابقة بشكل مباشر وفعال في تحسين أداء الأطراف الصناعية. يبيّن الشكل 1-1 أحد النماذج المتقدمة لطرف صناعي سفلي حيث تم فيه استخدام نوابض في الكاحل مع إضافة تفعيل للرابطة الدورانية فيه [1].



الشكل 1-1: نموذج لطرف صناعي سفلي يستخدم النوابض بهدف تحسين الأداء [1].

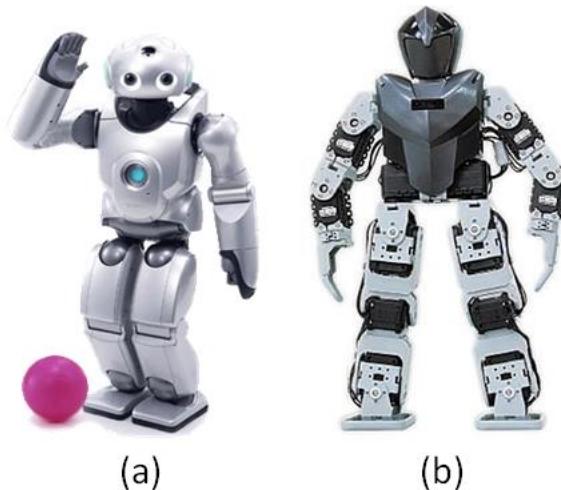
1-2 التطبيقات الروبوتية

يعتبر بناء روبوت بشري يتمتع بكافة مواصفات وقدرات الإنسان أحد أهم وأكثر التطبيقات طموحاً وتعقيداً. هذا الروبوت يمكن أن يحل محل البشر للقيام بالكثير من الأعمال التي تستنفذ الوقت والجهد بدءاً من الأعمال المنزليّة البسيطة وليس انتهاءً بالأعمال في المناطق الخطرة كساحات المعارك والمناجم والمناطق ذات التلوث الإشعاعي وربما الفضاء. على الرغم من أن الوصول إلى روبوت يتمتع بالكفاءة للقيام بكل الأعمال السابقة ما يزال بعيد المنال نسبياً، ولكن دراسة وفهم آلية الحركة عند البشر ومحاوله تقليدها أو حتى بناء نماذج روبوتية بكافأة حركية أعلى من ناحية معايير الأداء المختلفة يعتبر خطوة مهمة وأساسية في طريق الوصول إلى الهدف المطلوب. تعمل العديد من الشركات الكبرى على بناء نماذج روبوتية بشرية هادفين من وراء هذه النماذج الوصول إلى التطبيقات بعيدة المدى سابقة الذكر. من هذه الشركات شركة Honda [2] وشركة Toyota [3]، ونهايةً قدّمت شركة Boston Dynamics [4] نموذجاً روبوتياً يتمتع بقدرات متقدمة من ناحية القدرة على تجاوز العوائق والقفز والكافأة الحركية (الشكل 1-2).



الشكل 1-2: أمثلة عن الروبوتات البشرية المصنعة لأهداف بحثية. a) الروبوت Asimo من شركة Honda [2]. b) الروبوت Partner من شركة Toyota [3]. c) الروبوت Atlas من شركة Boston Dynamics [4].

يعتبر سوق الألعاب والتسلية من ناحية أخرى أحد التطبيقات العملية وقصيرة المدى لهذا الموضوع، وعملاً مساعداً على التطوير في هذا المجال. من الأمثلة عن بعض الشركات التي تعمل في هذا المجال شركة Sony [5]، وشركة Robotis [6] (الشكل 1-3).



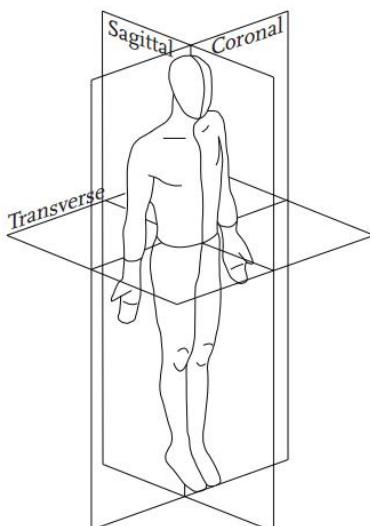
الشكل 1-3: أمثلة عن الروبوتات البشرية المصنعة بهدف التسلية. (a) الروبوت Qrio من شركة Sony [5]. (b) نموذج قابل للتركيب من شركة Robotis [6].

1-2 التعريف بالروبوتات ثنائية الأرجل

نعرف الروبوت ثنائي الأرجل biped robot بأنه نظام ميكاتروني بسلسلتين حركيتين على الأقل تمثلان الأرجل، تتصل السلسلتين بنقطة وحيدة تدعى الورك hip، كما يمكن إضافة سلسلة ثالثة في نقطة الورك تمثل خصر الروبوت، يمكن أن تحتوي رجل الروبوت على ركبة knee ونهاية بشكل قدم نقطية point feet أو بشكل قدم ذات حجم محدد finite sized feet. ندعوا الرجل المستندة على الأرض بالرجل الثابتة stance foot والرجل الأخرى المتحركة في الهواء بالرجل المتأرجحة swing foot.

يعرف المشي walking بأنه الحركة التي يتم فيها تحريك الأرجل بشكل متتالي نحو الأمام مع مراعاة عدم رفع كلتا الرجلين عن الأرض في وقت واحد، ونسمى طريقة المشي المتبعة بالمشية gait. تتألف المشية من عدد من الأطوار phases تتناوب بين الطور باستناد وحيد أو باستنادين وهما يحددان فيما إذا كانت أحد الرجلين أو كلاهما على تماس مع الأرض على التبالي. ندعوا المنطقة الناتجة عن مجموعة نقاط تماس الأرجل مع الأرض بمضلع الدعم support polygon.

يمكن توصيف حركة الروبوت انطلاقاً من وضعية الوقوف وفق ثلاثة مستويات يظهرها الشكل 1-4؛ المستوى الذي يقسم يمين ويسار الروبوت يدعى sagittal plane، والمستوى الذي يقسم الروبوت إلى جزأين أمامي وخلفي ندعوه coronal plane، والمستوى الذي يقسم الروبوت إلى جزأين علوي وسفلي transverse plane. ندعو الروبوت الذي يتحرك فقط في المستوى planar biped، وبالمقابل ندعو الروبوت الذي يتحرك في الفضاء ثلاثي البعد 3d dimensional biped. نرکز الاهتمام في بحثنا على الروبوتات بالروبوت ثلاثي الأبعاد فقط.



الشكل 1-4: مستويات الجسم المتعامدة في الروبوتات البشرية [7].

أثار موضوع التحكم بالروبوتات المشابهة للبشر اهتمام الكثير من العلماء على مرّ عقود لما لهذه الروبوتات من أهمية متوقعة في أن تحل محل الإنسان في مختلف الأعمال التي يقوم بها، ولكن موضوع التحكم بحركتها لم يكن بهذه السهولة ولم نصل حتى الآن إلى حركات بكفاءة ووثيقة عالية على الرغم من التقدم الهام الحاصل خلال السنوات الماضية في هذا المجال. أمّا عن سبب هذه الصعوبات في عملية التحكم وتوليد الحركات المطلوبة فيمكن ردها إلى تعقيد هذه الأنظمة والمتمثل بالسمات التالية [8]:

1. الديناميكي غير الخططي: وذلك عائد لكون مجال حركة الأرجل خارج مجال العمل الممكّن تقريريه بشكل خططي، وبالتالي يجب التعامل مع النظام بشكله اللاخطي الكامل.

2. الديناميـك متعدد المتغيرات: يتكون الروبوت من عدد من الوصلات تربط فيما بينها روابط، وتعطي هذه الرابط الروبوت درجات حرية تتفاعل وتعاون فيما بينها لأداء المهمة المطلوبة وبالتالي فلا يمكن اعتبار هذه الرابط مستقلة عن بعضها البعض.

3. ديناميـك غير مستقر بشكل طبـيعي: من الشروط المفروضة على عملية التحكم ضمان التوازن الديناميـكي للنظام على كامل حلقة المشـي، وهذا يتطلب الكثير من التحليل يفوق بأشـواط حالة التوازن الستاتيـكي.

4. طبيـعة التـماس بين الأرض وقدم الروبوت: هذا التـماس وحـيد الاتـجاه، بـمعنى أنـ الرابـطة النـاتـجة لا تـمنع الروـبوت من التـحرـر من الأرض في حال تـطـبيق قـوـة منـاسـبة وبالاتـجـاه المناسب، وبـالتـالـي يـجب عـلـى الروـبوت أـن يـتـحكـم بـهـذا التـمـاس عـن طـرـيق التـحكـم بالـرـوابـط الـآخـرى المـفعـلة بـيـن أـجزـائـهـ. بـالـمقـابـل لـا يـربـطـ الروـبوت بـجمـلة مـرجـعـية بـحيـث يـكـون ثـابـتاـً بـالـنـسـبة لـهـا وبـالتـالـي لـا يـمـكـن تحـديـد التـمـوـضـع فـي الفـضـاء بـشـكـلـ مـباـشـرـ.

5. ديناميـك متقطـع: يـفرض تـغـيـير تمـاس الـقـدـمـين مع الأرض بشـكـلـ مـتـتـابـع تـغـيـيرـاـً في الشـرـوط الـحدـيـة بشـكـلـ مـسـتـمرـ، كـما يـفـرض اـصـطـدامـهـما بالـأـرـض تـغـيـرات غـير مـسـتـمرة في سـرعـ مـكـونـاتـ الروـبوتـ.

على الرغم من الصـعـوبـيات المـذـكـورـة أـعـلاـهـ، فـقد تم اـقتـراحـ العـدـيد من النـمـاذـج لـرـوـبـوـتـاتـ المـشـيـ، وـتمـ التـحكـمـ فـيهـا وـتـولـيدـ حـركـاتـ بـاتـبـاعـ استـراتـيـجيـاتـ مـخـتـلـفةـ تـتفـاـوتـ مـنـ حيثـ صـلـادـتهاـ ضدـ الـاضـطـرـابـ وـاستـهـلاـكـهاـ لـلـطاـقةـ وـمـشـابـهـتهاـ لـحـرـكةـ الـبـشـرـ. يـمـكـنـ رـدـ هـذـهـ الـاسـتـراتـيـجيـاتـ عـلـىـ الرـغـمـ مـنـ تـفاـوتـهاـ إـلـىـ مـفـهـومـيـنـ أـسـاسـيـيـنـ يـشـكـلـانـ حـجـرـ الزـاوـيـةـ وـتـفـاـوتـ بـيـنـهـمـ طـرـقـ تـولـيدـ الحـرـكةـ [9]:

1. التـحكـمـ الـكـلـيـ الـمـحـلـيـ full local controllability
2. الـحـرـكةـ غـيرـ المـفـعـلةـ بشـكـلـ كـامـلـ full passivity لا يـطـبـقـ فـيهـاـ أـيـ تـفـعـيلـ أوـ تـحكـمـ لـتـولـيدـ الـحـرـكةـ.

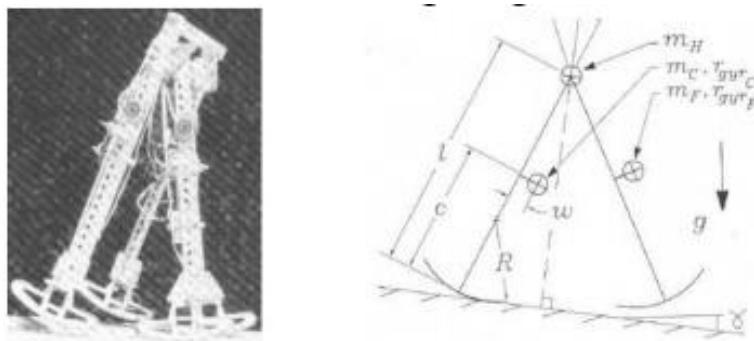
كان التـحكـمـ الـكـلـيـ الـمـحـلـيـ الـبـداـيـةـ التـيـ انـطـلـقـتـ مـنـهـاـ عـمـلـيـاتـ التـحكـمـ، حيثـ كـانـتـ الفـكـرةـ قـائـمةـ عـلـىـ بـنـاءـ تـحكـمـ مشـابـهـ لـلـتـحكـمـ المـسـتـخدـمـ فـيـ الـمـنـصـاتـ الـرـوـبـوـتـيـةـ التـقـليـدـيـةـ. نـقـصـدـ بـهـذاـ التـحكـمـ أـنـ تكونـ قـادـرـينـ عـلـىـ تـحـريـكـ الـرـوـبـوـتـ إـلـىـ أـيـ نـقـطـةـ فـيـ فـضـاءـ الـعـمـلـ خـلـالـ أـيـ فـاـصـلـ زـمـنـيـ بـمـاـ يـتـنـاسـبـ

مع إمكانيات الروبوت، ومن خلال هذه العمليات يمكن توليد تسلسل مسارات لحركة الأرجل موافقة لحركة أرجل الإنسان مع ضمان بقاء مسقط مركز كتلة جسم الروبوت ضمن موضع الدعم وهذه حالة الحركات الستاتيكية، أو من خلال ضمان بقاء نقطة نقطة انعدام العزوم zero moment point (ZMP) (وهي مسقط شعاع محصلة القوى المارة من مركز عطالة الجسم على الأرض) ضمن هذا الموضع وهذه حالة الحركات الديناميكية، يعود سبب فرض هذا الشرط إلى انعدام عزوم الدوران للروبوت في هذه النقطة، وبالتالي في حال انتقلت هذه النقطة مثلاً إلى أحد حواف موضع الدعم سيؤدي ذلك إلى توليد عزوم دورانية حول هذه الحافة مما يؤدي إلى سقوط الروبوت.

تؤدي عملية توليد المسارات لحركة الروبوت والتحكم بشكل مستمر بمفعالاته إلى فرض شروط على حركة الروبوت من نمط أن تبقى القدم على تماس كامل مع الأرض وهذا يؤدي إلى توليد حركات تبدو غير طبيعية وغير مشابهة لحركة البشر (كحركة الروبوت Asimo من شركة Honda [10])، كما أن عملية التحكم بموضع الروابط في كل لحظة يفرض استهلاكاً كبيراً للطاقة يفوق بعشرات المرات الطاقة المستهلكة من قبل البشر لتوليد حركات بنفس المواصفات (الروبوت Asimo مثلاً يستهلك عشر أضعاف الطاقة المستخدمة للكيلوغرام الواحد مقارنةً مع الإنسان [10]). إضافةً إلى ما سبق، تفرض عملية التحكم هذه التعامل مع حالات النقاط الشاذة وكيفية تجاوزها.

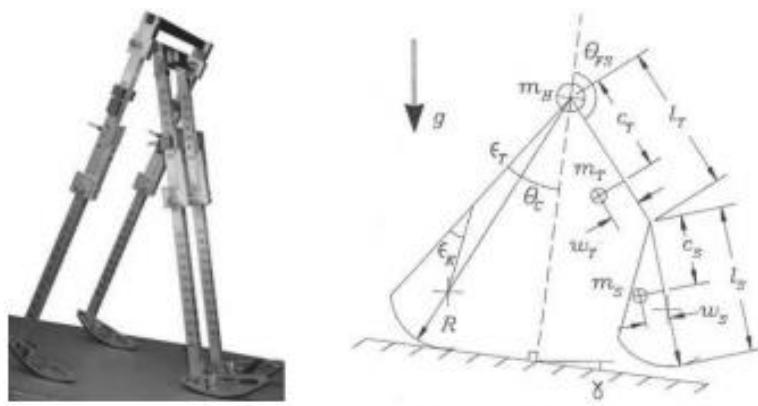
طرحت الطريقة غير الفعالة بشكل كامل على العكس من طريقة التحكم المحلي الكامل، وهنا لا يتم استخدام أي مفعلات أو تحكم. تعتمد فكرة هذه الطريقة على الملاحظة بأن حركة الرجل المتأرجحة للإنسان تشبه إلى حد بعيد حالة النواس المزدوج المقلوب، وبالتالي يمكن توليد حركة مشابهة بشكل كبير لمشية الإنسان بالاعتماد على الديناميكي الطبيعي للرجل المتأرجحة وبتوسيع الروبوت على منحدر بزاوية معينة. هذه الفكرة ليست بالحديثة ويعود ظهورها إلى القرن التاسع عشر [11] حيث استخدمت في بناء ألعاب تقلد حركة الإنسان، ولكن الظهور المباشر لها في المجال العلمي كان على يد McGeer [12] الذي انطلق من فكرة أن الأخوين رايت، وعند بنائهما لنموذج الطائرة الأولى، لم يزدداه بأي محركات، بل قاما بدأياً بتركيز اهتمامهما على الطائرات الشراعية بدون محركات، وبعد أن فهموا بشكل كامل القوى الديناميكية والتحكم بها قاما بإضافة محرك للطائرة. على الرغم من أن المحرك المضاف لم يكن الأفضل في ذلك الوقت، إلا أنهما نجحا في التحليق. لذلك قام McGeer بناء تصميمه المبدئي الأول الشكل 1-5 المؤلف من قضيبين يمثلان الأرجل بدون

ركب وزوّد جزأهما السفلي بأقواس دائرية لتحل محل القدم، وربطهما من الأعلى بروابط دورانية عبر محور دواراني يمثل الورك، كما قام بمضاعفة الأرجل وربط الرجلين الخارجيتين سوية والداخليتين كذلك لضمان حركة الروبوت في المستوى. من خلال دراسة ديناميك الحركة وعلاقة الصدم الناتج عن اصطدام الرجل مع مستوى الحركة، وجد أنه بتوضيع الروبوت فوق مستوى مائل بزاوية محددة عن الأفق، وبإعطاء الرجل المتأرجحة حالة ابتدائية محددة (زاوية وسرعة محددين)، يمكن أن نحصل على حركة متتابعة دورية للأرجل تشبه إلى حد كبير حركة الإنسان على أرض مستوية في الأوضاع الطبيعية. يمكن بشكل خشن تفسير الحركة التي حصل عليها McGeer بأن الجاذبية الأرضية ستقوم بدعم حركة الرجل المتأرجحة نحو الأمام، وعند وصول القدم إلى نقطة الاصطدام بالأرض تعود الرجل إلى الحالة الابتدائية لها (من حيث السرعة والموضع) نتيجةً للطاقة التي يخسرها الجسم نتيجة الاصطدام، وفي لحظة الصدم تفقد الرجل الخلفية (الرجل الساكنة) التماس مع الأرض وتبدأ هي الأخرى بالتأرجح وتتبادل الأرجل الأدوار، ونضمن الحركة الدورية نتيجةً لعودة كل من الرجلين إلى حالتهما الابتدائية بعد كل اصطدام.



الشكل 1-5: روبوت McGeer غير الفعال بأقدام مستقيمة [12].

أضاف McGeer [13] لتصميمه ركبتين؛ واحدة في كل رجل لتجنب تصادم الرجل المتأرجحة مع الأرض وتمكن أيضاً من الحصول على حركة دورية تشبه إلى حد كبير حركة الإنسان أثناء المشي (الشكل 1-6).



الشكل 1-6: روبوت McGeer غير الفعال مع الركبتين [13].

بالتالي، بين McGeer أنه يمكن الحصول على حركة المشي بإضافة مفعولات تعوض ما تقوم به الجاذبية الأرضية وبدون الحاجة إلى التحكم الكامل المحلي بموضع كل رجل وإجبارها على الحركة على مسارات محددة بل ترك المهمة للديناميكي الطبيعي للأرجل ليقوم بالمهمة.

انطلاقاً من دراسات McGeer، بدأت الأبحاث على التصميم البسيط المقترن وبدأت الإضافات بشكل متتالٍ، فتم إضافة جسم للروبوت وإثبات قدرته على تحسين الحركة من ناحية زيادة السرعة والاستقرار [14,15]، كما تم دراسة أثر الأقدام على الحركة وبناء قدم مسطحة عوضاً عن المقوسة [17]، وأضيفت مفعولات لحركة الأقدام ودرس أثرها في زيادة السرعة والاستقرار [16]، وأجريت دراسات لتحقيق الاستقرار في الوسط ثلاثي البعد [14,9].

تكمن النقلة النوعية في دراسة هذا النمط من الروبوتات والتي حققها McGeer في تغيير التوجه من الدراسة الكاملة للروبوتات ومحاولة بناء روبوت يشابه إلى حد كبير الإنسان وبناء مسارات لحركة الأرجل مشابهة لتلك المتبعة من قبل الإنسان، إلى الدراسة التدريجية البسيطة انطلاقاً من المبدأ العام (قضيبين يربط بينهما رابطة دوارة على منحدر) وفهم آلية العمل ومن ثم البناء التدريجي لنماذج أعقد من خلال إضافات تضمن صلادة أكبر وحركة أسرع وكفاءة طاقية أعلى، وصولاً إلى الهدف الرئيسي الشامل والمتضمن بناء روبوت قادر على القيام بحركات بكافأة مشابهة للإنسان.

مهدت الدراسات التي قام بها McGeer ومن بعده إلى نشوء فرع جديد في مجال التحكم بحركة الروبوتات برجلين يسمى المشي الديناميكي انطلاقاً من الحالة غير المفعولة passivity-based dynamic bipedal walking [26]. يتضمن هذا الفرع كل الروبوتات التي تعتمد بشكل أو

بآخر على ديناميكها الداخلي لتوليد مسارات الحركة حيث تكون وظيفة التحكم هنا تعويض الفاقد في الطاقة أو زيادة قدرة الروبوت على تجاوز العائق و"الاضطراب" إضافةً إلى التحكم بسرعة حركة الروبوت وأنماط الحركة التي يؤديها. بشكل عام، لا يتطرق التحكم في هذه الحالة بشكل مباشر إلى المسارات التي ترسمها الأرجل في حركتها ويترك الموضوع للديناميكي الداخلي.

لما كان الاعتماد في طرق التحكم سابقة الذكر على الديناميكي الداخلي، فإنّ استخدام مفعولات صلبة في مفاصل الروبوت غير ممكن لكونه يعيق الحركة الحرة للأجسام المشكّلة للروبوت ويعنّها من اتباع ديناميكها الداخلي. لذلك ظهرت الحاجة إلى استخدام المفعولات المرنّة، أحد أشكال المفعولات المرنّة هو مفعّل كهربائي مرتبط على التسلسل مع نابض مرن، وتعطي هذه التشكيلة القدرة على التحكم بموضع الرابطة عن طريق التحكم بنقطة توازن النابض، ولهذا الأمر دور إيجابي في امتصاص الصدم، إلا أنّ هذه الطريقة محدودة كون الديناميكي الطبيعي للروبوت ككل ثابت ويتحدد عن طريق ثوابت صلابة التوابع المستخدمة، وبالتالي سيتحرك الروبوت بسرعة ثابتة يحدّدها التردّد الطبيعي. لهذا السبب، ظهرت الحاجة إلى استخدام مفعولات مرنّة تمتلك القدرة على تغيير مرونته بهدف التحكم بالديناميكي الداخلي للروبوت مما يعطي القدرة على تحكم أوسع بـمجال السرع وأنماط الحركة التي يمكن الحصول عليها، وبالتالي زيادة قدرة الروبوتات المعتمدة على المبدأ غير الفعال.

يمكن تلخيص الأفكار السابقة بالقول أنّه يمكن تطوير روبوت ثبائي الأرجل قادر على الحركة بشكل مشابه لحركة البشر وبكفاءة طاقية عالية وقدرة على إتباع أنماط مختلفة من الحركة وذلك بالاعتماد على الديناميكي الداخلي لنموذج الروبوت مع استخدام مفعولات ذات مرونة متغيرة تعطي القدرة على تغيير الديناميكي الداخلي للانتقال بين أنماط الحركة المختلفة. تؤدي هذه الروبوتات حركة مستقرة دورية تتناوب فيها الأرجل في عملها، ولكن في حال نظرنا إلى الروبوت في كل لحظة من لحظات هذه الحركة سنجد أنه غير مستقر في هذا الموضع المحلي وهذا ما دعاه [9] Hobblen بمصطلح المشي بالحلقة الحدية limit cycle walking.

3-1 مشكلة البحث

موضوع بناء روبوت قادر على الحركة بكفاءة تصاهي حركة البشر هو موضوع متشعب ويشمل العديد من الجوانب سواء من ناحية التصميم الميكانيكي الذي يتضمن اختيار عدد درجات الحرية المناسبة

للروبوتات وعدد المفعولات وطريقة التفعيل وكيفية اختيار معاملات التصميم الميكانيكي التي تعطي الأداء المتوازن بين معاملات أداء مختلفة، أو من ناحية طرق التحكم التي تتضمن العديد من محاور البحث ابتداءً من طرائق التحكم التقليدي وانتهاءً بطرائق التحكم الذكي. على الرغم من تنوع وتشعب محاور البحث المرتبطة بالروبوتات ثنائية الأرجل، لم يتم حتى اليوم الوصول إلى الأداء الكافي لتدخل هذه الروبوتات المجال العملي والتطبيقي والموضوع بمجمله وبكافحة محاوره لم يزل قيد البحث رغم التقدم الملحوظ الذي حصل خلال السنوات القليلة الماضية.

تعتبر طرائق التحكم المعتمدة على الحالة غير المفعولة أحد الطرق الواحدة للوصول إلى الأداء المرضي لهذا النوع من الحركات، وهي، ومما لا شك فيه، ستكون الطريقة الأمثل للحصول على الأداء والوفر الطاقي الأعلى نظراً لاعتمادها بشكل مباشر على ديناميک الروبوت. لذلك نجد أنّ هذا المحور يمتلك أهمية خاصة وواعدة في الهدف النهائي المراد الوصول إليه. إنّ اعتماد هذه الطرائق على الديناميک يفرض إعطاء أهمية خاصة لمعاملات التصميم الميكانيكي المختلفة للحصول على أفضل أداء ديناميكي ممكن، وكذلك يجب اختيار طرائق تحكم مناسبة تتضمن المحافظة على إيجابيات الاستفادة من الديناميک وتجاوز السلبيات المتعلقة بانعدام التنوع في الحركات وانخفاض الصلادة ضد الاضطراب. هذا يفرض مجموعة من الأسئلة يُطلب الوصول إلى إجابة عنها فيما يتعلق بطريقة اختيار معاملات التصميم الميكانيكي وطريقة التحكم المناسبة لهذا النوع من الحركة.

4-1 أهداف البحث

الهدف الرئيسي من البحث هو دراسة المبادئ الديناميكية وراء حركات المشي وذلك انطلاقاً من المشي غير الفعال، ومن ثم دراسة إمكانية الانتقال إلى الحركات المفعولة في محاولة لتجاوز نقاط الضعف في المشي غير الفعال المتمثل بانخفاض الصلادة ضد الاضطراب وعدم التنوع في الأداء، مع المحافظة على الإيجابيات المتمثلة بانخفاض الاستهلاك الطاقي نتيجة الاعتماد على الديناميک الداخلي في توليد الحركة.

الأسئلة المتوقع الوصول إلى إجابات عنها في نهاية البحث:

1. ما هو أثر معاملات التصميم الميكانيكي على تحسين الأداء في الروبوتات غير المفعولة بشكل كامل؟

2. ماهي الطريقة الأمثلية للانتقال من الحركة غير المفعولة إلى الحركة المفعولة مع السعي للحصول على أفضل تنوّع في الأداء وأفضل مقاومة للاضطراب وأفضل مشابهة لحركة البشر بأقل تعقيد تحكمي؟

3. هل يمكن لمعاملات التصميم الميكانيكي أن يكون لها تأثير كبير على الأداء بعد إضافة التحكم، أو يمكن تجاوز الفروقات وتحسين الأداء بالاعتماد على منظومة التحكم فقط؟

يحتاج الإجابة عن الأسئلة السابقة بدايةً بناء نموذج روبوتي غير مفعّل يستمد الطاقة اللازمة لحركته من الحركة على منحدر. يتضمن ذلك اختيار نموذج تصميمي للروبوت المراد إجراء الدراسات عليه ومن ثم إيجاد المعادلات الديناميكية الحاكمة لعمل النموذج، بليه بناء النموذج باستخدام أحد أدوات النمذجة.

بعد بناء النموذج المراد إجراء الدراسات عليه تقوم بدراسة معاملات التصميم الميكانيكي المختلفة وأثّرها على أداء الروبوت، وذلك من خلال تحديد مجموعة من معاملات الأداء المعتمدة في الأدبيات. تهدف هذه الدراسة إلى تعميق استيعابنا للنمذج غير المفعولة وارتباط أدائها بمعاملات التصميمية. بناء على الدراسات السابقة، تقوم باختيار مجال المعاملات الأمثلية الذي يمكن اعتماده لبناء نموذج روبوتي مستقبلي وذلك بتعريف مسألة أمثلة بتواجد كلفة متعلقة بمعاملات الأداء المختلفة.

يحتاج الانتقال من النموذج غير المفعّل إلى النموذج المفعّل اختيار خوارزمية التحكم المناسبة. هذه الخوارزمية يجب أن تمتلك القدرة على الاستفادة من إيجابيات المشي المعتمد على المبدأ غير الفعال، وأن تتجاوز قدر الإمكان سلبيات هذه الحركة من خلال زيادة مجال السرع وطول الخطوات التي يمكن بلوغها والانتقال أثناء الحركة بين الأنماط المختلفة. نرّكز أيضًا على زيادة صلادة النموذج ضد الاضطراب باختيار إجرائية مناسبة لهذه الغاية.

يتناول البحث بشكل أساسي الدراسات النظرية التي تهدف إلى الوصول إلى اختيار معاملات تصميمية أمثلية، وطريقة تحكم مناسبة تمهدًا لبناء نموذج روبوتي حقيقي على أساس سليمة في دراسات مستقبلية.

5-1 الدراسة المرجعية

نورد فيما يلي مجموعة من الدراسات المرجعية المتعلقة بدراسة أثر معاملات التصميم الميكانيكي على أداء الروبوتات غير المفعولة بشكل كامل، ومن ثم نعرض أهم الدراسات المتعلقة بالانتقال من النمط غير الفعال إلى النمط الفعال.

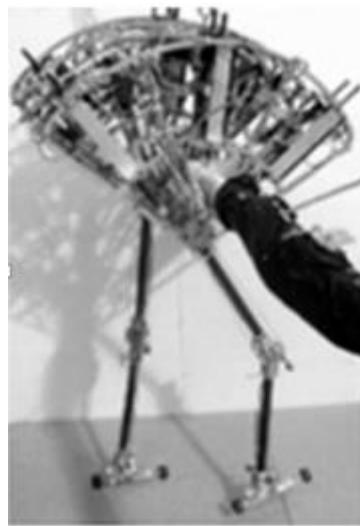
1-5-1 دراسة مرجعية لمعاملات التصميم للروبوتات ثنائية الأرجل المعتمدة على الحلقة الحدية

أجريت العديد من الدراسات على معاملات التصميم الميكانيكية، ابتداءً من الدراسات على النماذج البسيطة غير المفعولة المكونة من رجلين مع قدم مقوسة بقطر دائرة محددة [21]، مروراً بالنماذج المكونة من سبعة أجسام (جسم علوي – فخذين – ساقين – قدمين مسطحتين). دُرس أيضاً تأثير توزع كتل الأجسام المكونة للروبوت ومراعاة عطالتها على معاملات الأداء المختلفة لروبوت مكون من أربع أجسام مع درجتي حرية [18]، كما تم إثبات أنّ القدم المسطحة أفضل من ناحية الاستقرار من القدم المقوسة [17]، ودُرس أثر الزاوية التي تصدم فيها الرجل المتأرجحة الأرض على الاستقرار [19]، كما قام Zung [20] بدراسة أثر معاملات التصميم المختلفة على مجموعة الشروط الابتدائية التي يمكن منها الانطلاق والحصول على حركة مستقرة لروبوت غير مفعول مكون من سبعة أجسام يتم تحريكها على منحدر مائل. ركزت معظم الدراسات السابقة على موضوع دراسة كل معامل من المعاملات على حدة دون التطرق لمسألة التأثير المشترك بين هذه المعاملات.

2-5-2 دراسة مرجعية لطرائق التحكم بالروبوتات المعتمدة على المبدأ غير الفعال

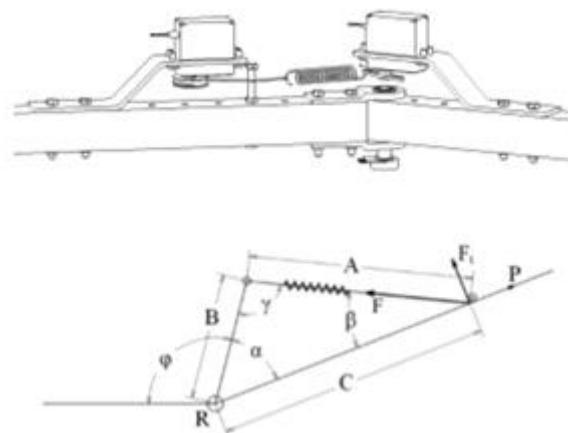
كما ذكرنا سابقاً، ما يميّز المشي بطريقة الحلقة الحدية أنه لا يتطلب ضمان استقرار الحركة محلياً عند كل نقطة في فضاء الحالة، وإنما يعتمد بشكل كبير على الديناميک الطبيعي للتصميم الميكانيكي لتحقيق الحركة، حيث تترك الرجل المتأرجحة لتنارجح بشكل حر بمجرد أن تبدأ حركتها. تزود الركبة بآلية قفل ميكانيكي تمنع الرجل من الانعكاس، كما يمكن أن يستخدم الكاحل المرن لنقل مركز الضغط (Center of pressure) على طول القدم ليساعد في رفع أصابع القدم. Toe-off

كل هذه الميكانيزمات تساعد في بناء تحكم سهل وبسيط ينتج عنه حركات سلسة وبمظهر طبيعي. إذًا يمكن بالاعتماد على الديناميک الطبيعي بناء خوارزميات تحكم بسيطة، فمثلاً في [22] تم بناء تحكم بسيط بالروبوت flamingo المبين في الشكل 1-7 بالاعتماد على state machine. يتطلب هذا التحكم فقط مواضع الروابط وسرعها إضافة إلى موضع وسرعة جسم الروبوت مع تحسين لقوة تماس الأرجل مع الأرض.



.[22] Flamingo

كما ذكرنا سابقاً، فرضت الحاجة إلى تغيير الديناميک الداخلي للروبوت أثناء حركته بناء مفعّلات تمتلك القدرة على تغيير مرونتها أثناء الحركة، وأحد نماذج المفعّلات المستخدمة لهذه الغاية هو النموذج المسمى MACCEPA [23] المبين في الشكل 1-8، وفيه يتم التحكم بالعزم عن طريق التحكم بنقطة توازن النابض والتي تحددها الزاوية α التي نتحكم بها عن طريق المفعّل الأول الذي يقع محوره على محور الرابطة. ويتم التحكم بمرونة النابض بتغيير الشد المبدئي للنابض عن طريق المفعّل الثاني. استخدم هذا المفعّل للتحكم بالروبوت Veronica [24] المبين في الشكل 1-9 وهو روبوت مستوي بست درجات حرية، وأعطى أداءً جيداً من ناحية الأداء الطاقي والقدرة على الانتقال بين الأنماط المختلفة بشكل مباشر أثناء الحركة.



الشكل 1-8: المفعّل MACCEPA بمحركين والذي يعطي القدرة على التحكم بالعزم والمرونة [23].



الشكل 1-9: الروبوت Veronica وهو روبوت مستوي بست درجات حرية يتم ضمان الحركة المستوية عن طريق ربطه بقضيب يمنع الحركة في الاتجاه المعامد لاتجاه الحركة [24].

نهايًّاً قام Huang [25,26,27] باستخدام طرق التحكم القائمة على أساس بيولوجي biological-inspired control methods وبشكل أكثر تحديداً، مولدات النمط Central Pattern Generators للتحكم بمرونة وعزوم المفعلات المرنة في الروبوتات ثنائية الأرجل في محاولة منه لتحسين أداء هذه الروبوتات. أعطى تطبيق هذه الطريقة على نموذج ربوتي مكون من ست درجات حرية وسبعة أجسام نتيجة جيدة من ناحية الصلاحة ضد الاضطراب والتنوع في الأداء والوفر الطافي. بالنسبة لمولدات النمط المركبّة فهي عبارة عن خلايا

عصبية موجودة في النخاع الشوكي للفقاريات وفي العقد القطعية لغير الفقاريات [28]. ما يميّز هذه الخلايا هو قدرتها على توليد أنماط دورية من الإشارات مناسبة لأداء حركات الانتقال لمختلف الكائنات كتحريك الأرجل لأداء حركة المشي عند رباعيات الأرجل. يتم تفعيل هذه الخلايا باستخدام إشارات كهربائية من الجهاز العصبي المركزي العلوي، وبتغيير شدة هذه الإشارة يمكن تغيير سرعة المشي عند المتحرك. بنيت العديد من النماذج لتمثيل هذه المهارات رياضياً [30] وتم الاستفادة من أنماطها الدورية في التحكم بالنماذج الروبوتية [31,32]. إن التخفيف الكبير في عدد إشارات التحكم والقدرة على الانتقال بين أنماط مختلفة للحركة باستخدام عدد محدود من إشارات التحكم [28] إضافةً إلى صلادة هذه الأنماط ضد الاضطراب [29]، جعلت هذه النماذج محط اهتمام توليد حركة المشي في الروبوتات ذات الرجلين.

6-1 الخلاصة

تمَّ في هذا الفصل التعريف بالروبوتات ثنائية الأرجل وأهميتها وتطبيقاتها المستقبلية، ورَكِنَنا على الروبوتات المعتمدة على الديناميكي الداخلي كطريقة واحدة للوصول إلى الهدف النهائي المتمثل بروبوتات ثنائية الأرجل قادرة على أداء حركات مشي بالكافاءة التي يقوم بها البشر. عرضنا دراسة مرجعية تتعلق بأمثلة التصميم الميكانيكي لهذه الروبوتات إضافةً إلى مجموعة من الطرق المعتمدة للتحكم بها، وبناءً عليه حدّدنا الهدف من الدراسة بناءً نموذج روبوتي غير مفعّل بسبعين درجات حرية وباختيار أمثلٍ لمعاملاته الميكانيكية مع دراسة إمكانية الانتقال من النموذج غير المفعّل إلى المفعّل بالاعتماد على مولدات النمط المركزي بما يمكن من تحسين الصلادة ضد الاضطراب وزيادة التنوع في الحركات التي يمكن أداؤها مع المحافظة على إيجابيات الاستفادة من الديناميكي الطبيعي في تحقيق الوفر الطاقي.

الفصل الثاني

النَّمْذَجَةُ الدِّينَامِيكِيَّةُ وَالْحَرْكِيَّةُ لِلرُّوبُوتَاتِ ثَنَائِيَّةِ الْأَرْجُلِ غَيْرِ الْمَفْعَلَةِ

نَقْوَمُ فِي هَذَا الفَصْلِ بِبِنَاءِ نَمْوذِجٍ لِلرُّوبُوتِ الَّذِي سَنَعْتَمِدُهُ فِي دراساتِنَا التَّالِيَةِ وَذَلِكَ بِاخْتِيَارِ طَرِيقَةِ النَّمْذَجَةِ الْمُنَاسِبَةِ
بِمَا يَلِبِّي الْهَدْفَ الْمُوْضَوْعَ لِلْدِرْسَةِ، وَاخْتِيَارِ هِيَكْلِيَّةِ الرُّوبُوتِ الَّتِي تَتَضَمَّنُ اخْتِيَارَ عَدْدِ دَرَجَاتِ الْحِرْبَةِ وَالْأَجْسَامِ
الْمَكْوَنَةِ لَهُ.

1-2 مقدمة

نجري في هذا الفصل دراسة تهدف إلى اعتماد الطريقة المناسبة في بناء النموذج الحاسوبي للروبوت الذي سنجري عليه دراستنا في الفصول التالية. تم بدأً اعتماد الطريقة المناسبة من خلال بناء نموذج روبوتي غير مفعّل بسيط مكون من أربعة أجسام (فخذدين وساقين) وأربع درجات حرية (اثنتين في الركبة واثنتين في الخصر) باستخدام طريقتين في النمذجة، تعتمد الطريقة الأولى على المعادلات الديناميكية وعلى تقسيم حركة الروبوت إلى عدة أطوار، بينما تعتمد الطريقة الثانية على بيئة Multibody Simscape. نقارن بين هاتين الطريقتين من حيث النتائج وזמן التنفيذ وإمكانية الاستفادة منها لخدمة الهدف من المشروع والمتمثل في دراسة أثر معاملات التصميم الميكانيكي في تحسين أداء الروبوتات ذات الرجلين غير المفعّلة، إضافةً إلى إمكانية تطوير نظام تحكم يستفيد من الديناميک الداخلي للروبوت.

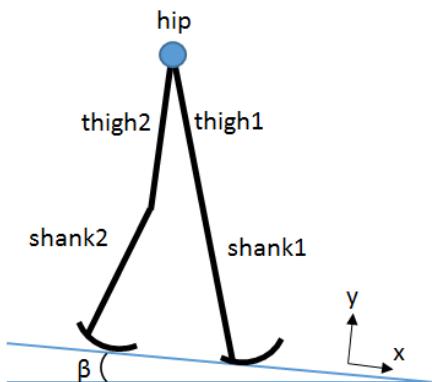
بعد اعتماد طريقة النمذجة المناسبة، نجري دراسة على نموذج روبوتي غير مفعّل مكون من سبعة أجسام (جسم علوي - فخذدين - ساقين - قدمين) وست درجات حرية، حيث نعتمد هذا النموذج في دراستنا في الفصول اللاحقة.

يمكن تلخيص الهدف من هذه الدراسات بالنقاط التالية: استيعاب مبادئ الحركة غير المفعّلة، واختيار طريقة النمذجة المناسبة، إضافةً إلى بناء النموذج النهائي للروبوت.

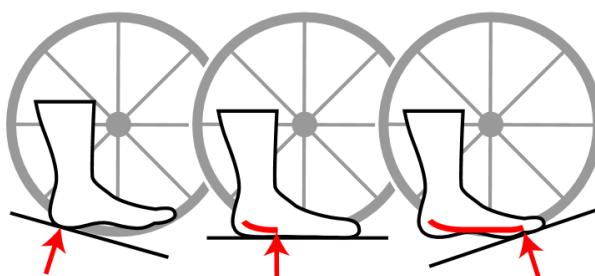
2-2 نموذج الروبوت البسيط

نقوم بدأً باعتماد نموذج بسيط للروبوت وذلك بهدف استيعاب المبادئ الحاكمة لحركة الروبوتات غير المفعّلة والمقارنة بين طريقتين في النمذجة: الأولى باستخدام النمذجة الديناميكية باستخدام المعادلات الرياضية والثانية باستخدام مكتبة Simscape Multibody في بيئة R2017b Matlab. تشكل النتائج التي وصلنا إليها أساساً لبناء النموذج الكامل الذي نعتمد في دراستنا التالية.

يبيّن الشكل 2-1 النموذج المقترن للروبوت، وهو عبارة عن روبوت مستوى ثنائي الأرجل بأربعة أجسام؛ (فخذدين (يميني ويساري)، وساقين (يمينية ويسارية))، وأربعة مفاصل للحركة (مفصل الركبتين ومفصل الفخذين). نعتبر أن قدمي الروبوت على شكل أقواس بشكل مشابه لدراسات سابقة [13,35]، حيث دلت الدراسات أن نقاط استناد رجل الإنسان خلال حركته تعرف قوساً بقطر محدد بسلوك مشابه لحركة العجلة [33,34] كما هو مبيّن في الشكل 2-2. الروبوت غير مفعّل أي أنه لا توجد آلية مفعّلات في مفاصل الحركة، ويستمد الروبوت الطاقة اللازمة لحركته من حركته على منحدر بزاوية ميلان β كما يبيّن الشكل 2-1.



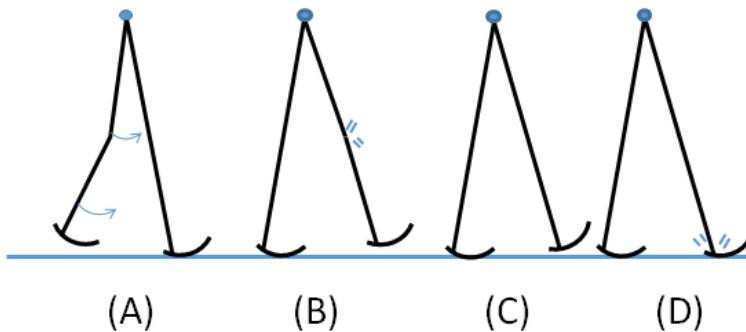
الشكل 2-1: رسم توضيحي لروبوت مستوى بسيط غير مفعّل مكون من أربعة أجسام وأربع درجات حرية.



الشكل 2-2: سلوك قدم الإنسان أثناء الحركة [33,34].

2-1-2 توصيف حركة الروبوت

إن المطلوب من الروبوت هو التحرك بشكل مشابه لحركة الإنسان. نستنتج بناءً على ذلك أن الحركة تمر بعدة أطوار قبل تحقيق خطوة كاملة والعودة إلى الحالة الابتدائية. تكون هذه الأطوار في حال اعتبرنا نقطة البداية هي النقطة التي تلي مباشرة رفع الرجل الخلفية عن الأرض كالتالي (الشكل 2-3):



الشكل 2-3: أطوار حركة الروبوت البسيط.

الطور الأول (A): ترتفع الرجل الخلفية عن الأرض وتحرك بشكل حر نحو الأمام. نسمّي هذه الرجل بالرجل المتأرجحة، ويكون مفصل الركبة فيها حر الحركة، بينما ندعو الرجل الأخرى الملامسة للأرض بالرجل المستقرة وتكون الركبة فيها ممدودة ونفرض أنّ مفصل الركبة مقفلٌ في هذه الحالة (غير مفعّل).

الطور الثاني (B): عند وصول الرجل المتأرجحة إلى مرحلة متقدمة من الحركة، وعند شروط معينة، تصطدم ساق الرجل المتأرجحة مع الفخذ لتنقل حركة الركبة وتنتقل إلى طور الحركة التالي.

الطور الثالث (C): يكون مفصل الركبة مفتوحاً في الرجلين في هذا الطور، وتكون أحد الرجلين متراجحة والثانية مستقرة ويستمر ذلك حتى تصدم الرجل المتأرجحة الأرض لتننتقل إلى الطور التالي.

الطور الرابع (D): عند اصطدام الرجل المتأرجحة مع الأرض تصبح كلتا الرجلين مماستين للأرض وتكون الركبتان مفتوحتين في هذا الطور.

ترتفع الرجل التي كانت مستقرة في الطور السابق عن الأرض في لحظة الصدم مباشرةً لتصبح هي الرجل المتأرجحة، وتصبح الرجل المتأرجحة من الطور السابق هي الرجل المستقرة، ونعود وبالتالي إلى الطور الابتدائي الذي انطلقنا منه (A).

تضمن عودة شعاع حالة النظام في نهاية الطور الرابع إلى وضعه الابتدائي في بداية الطور الأول حركة دورية تتتالي فيها الأرجل بالأدوار وتحقق حركة المشي المطلوبة وهذا الأمر الذي نسعى إليه، ولكن بدايةً يجب إيجاد النموذج الديناميكي الحاكم لحركة الروبوت خلال هذه الأطوار المختلفة.

2-2-2 النمذجة الديناميكية

نقوم بدايةً في هذه الفقرة باستخراج المعادلات الرياضية الموصفة للنموذج البسيط، ومن ثم ندرس نموذج الروبوت حاسوبيًّا في بيئة Matlab R2017b.

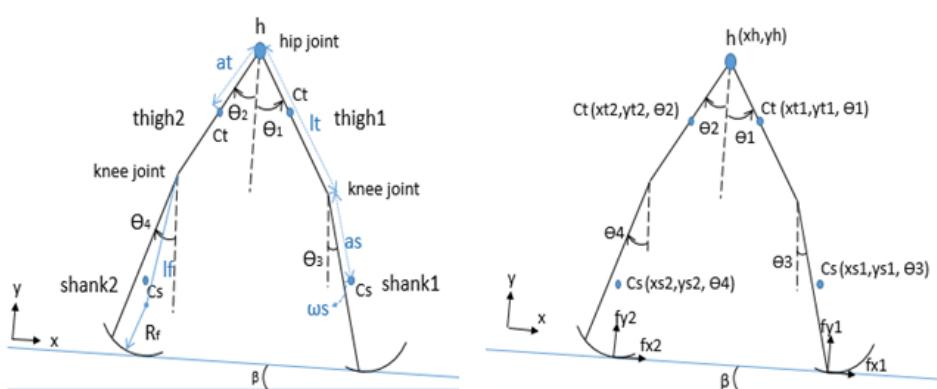
2-2-2-1 استtraction المعادلات الرياضية

نوصّف نموذج الروبوت باستخدام الإحداثيات الإقليدية \mathbf{x} Euclidean coordinates، حيث نعتبر أن المحور x موازٍ للمنحدر الذي يتحرك عليه الروبوت، والمحور y معتمد لاتجاه الحركة وباتجاه الأعلى، ويتم تمثيل كل جسم بإحداثيات مركز عطالته وزاويته بالنسبة للشاقول.

يكون شعاع الإحداثيات الإقليدية للنموذج:

$$\mathbf{x} = [x_h, y_h, x_{t1}, y_{t1}, \theta_1, x_{t2}, y_{t2}, \theta_2, x_{s1}, y_{s1}, \theta_3, x_{s2}, y_{s2}, \theta_4] \quad (2-1)$$

يوضح الشكل 2-4 والجدول 2-1 دلالة الرموز السابقة.



الشكل 2-4: معاملات النموذج البسيط.

كما يمكن توصيف النموذج باستخدام الإحداثيات المعمّمة :generalized coordinates

$$q = [x_h, y_h, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4] \quad (2-2)$$

نقوم فيما يلي بنمذجة كل طور من الأطوار بشكل منفصل، ونعتمد مجموعة من الفرضيات التبسيطية بشكل مشابه لدراسات سابقة [13,35]:

- الصدم لحظي لا يتبع عنه أي ارتداد أو انزلاق.
- التماس مع الأرض هو تماس بدون انزلاق.
- لا يمكن أن تتغير الإحداثيات المعتمدة [] بشكل مفاجئ في اللحظة التي تلي الصدم مباشرةً.
- تبتعد الرجل المستقرة عن الأرض في اللحظة التي تسبق صدم الرجل المتراجحة الأرض مباشرةً.

يمكن نمذجة كل طور الحركة اعتماداً على الملاحظات السابقة كالتالي:

الطور الأول: حالة رجل متراجحة مع رجل مستقرة

تحرك الرجل المستقرة في هذا الطور، والتي نفرضها الرجل 1، لتتغير في كل لحظة نقطة تماسها مع الأرض المحددة بنقطة تماس القدم المقوسة مع الأرض، وتتأرجح الرجل الأخرى حول رابطة الخصر بالنسبة للفخذ وحول الركبة بالنسبة للساقي. تُلغى في هذا الطور درجة الحرية المرتبطة بالركبة للرجل المستقرة، وتصبح السرعة الزاوية للساقي المستقرة متساوية للسرعة الزاوية للفخذ.

يمكن كتابة الإحداثيات الديكارتية الموصفة لموضع أجسام الروبوت بدالة الإحداثيات المعتمدة:

$$x = x(q) \quad (2-3)$$

باشتقاء العلاقة السابقة:

$$\begin{aligned} \delta x &= J \delta q \\ \ddot{x} &= J \ddot{q} + J \dot{q} \end{aligned} \quad (2-4)$$

حيث:

$$\begin{aligned} J &= \partial x / \partial q \\ J' &= \partial(J\dot{q}) / \partial q \end{aligned} \quad (2-5)$$

بتطبيق مبدأ العمل الافتراضي على الروبوت:

$$\delta x^T [f - M\ddot{x}] = 0 \quad (2-6)$$

حيث تمثل المصفوفة M كتل الأجسام المشكّلة للروبوت وعزم العطالة حول المحاور المارة من مراكز العطالة والمعامدة لمستوي الحركة، ونكتبها بالشكل:

$$M = \text{diag}([m_h, m_h, m_t, m_t, I_t, m_t, m_t, I_t, m_s, m_s, I_s, m_s, m_s, I_s]) \quad (2-7)$$

بينما تمثل f القوى والعزم الخارجية المؤثرة على الروبوت وهي القوى الناتجة عن الجاذبية الأرضية f_g والتي تؤثر في مراكز العطالة للأجسام المشكّلة للروبوت، وقوى الاحتكاك f_c مع الأرض والمطبقة في نقط التماس معها كما يبيّنها الشكل 2-4:

$$\begin{aligned} f &= f_g + f_c \\ f_g &= Mg [\sin(\beta), -\cos(\beta), \sin(\beta), -\cos(\beta), 0, \\ &\quad \sin(\beta), -\cos(\beta), 0, \sin(\beta), -\cos(\beta), 0, \sin(\beta), -\cos(\beta), 0]^T \\ f_c &= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, f_{x1}, f_{y1}, l_{gx1}f_{y1} + l_{gy1}f_{x1}, 0, 0, 0]^T \end{aligned}$$

وهي:

β زاوية المنحدر الذي يسير عليه الروبوت.

l_{gx1}, l_{gy1} : مسقطاً بعد بين مركز عطالة الساق ونقطة تطبيق القوة (نقط التماس مع الأرض) وفق المحورين x, y .

بتعمويض العلاقة (2-4) في العلاقة (2-6) نحصل على:

$$\delta q^T J^T [f - M(J\dot{q} + J\ddot{q})] = 0 \quad (2-8)$$

والتي يمكن إعادة صياغتها بالشكل:

$$M_q \ddot{q} = J^T f_g + J^T f_c - J^T M J \dot{q} \quad (2-9)$$

حيث: $M_q = J^T M J$ مصفوفة الكتل المعتممة.

إذاً لدينا خمس معادلات (نظراً لغلق الركبة وبالتالي إلغاء درجة الحرية المرتبطة بها)، وسبعة مجاهيل للحالة وهي الإحداثيات المعتممة q وقوى التماس مع الأرض (f_{x1}, f_{y1}). وبالتالي يلزم شرطان إضافيان ليصبح النظام محدداً بالكامل. يمكن استخلاص هذين الشرطين من ملاحظة أن سرعة نقطة الجذع h تعرّف في هذا الطور بالنسبة للأرض وضمن فرضية أن التماس مع الأرض هو تماس بدون انزلاق بالشكل التالي:

$$\begin{aligned} \dot{x}_h &= -l_t \cos(\theta_1) \dot{\theta}_1 - l_f \cos(\theta_1 + q_f) \dot{\theta}_1 - R_f \dot{\theta}_1 \\ \dot{y}_h &= -l_t \sin(\theta_1) \dot{\theta}_1 - l_f \sin(\theta_1 + q_f) \dot{\theta}_1 \end{aligned} \quad (2-10)$$

باشتقاء العلاقة السابقة بالنسبة للزمن وإعادة تشكيلها يمكن كتابتها بالشكل:

$$Q \ddot{q} = C(q, \dot{q}) \quad (2-11)$$

بالعودة إلى العلاقة (2-9)، يمكن أن نبرهن أن:

$$\begin{aligned} J^T f_c &= J^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1_{gy1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1_{gx1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} f_{gx1} \\ f_{gy1} \end{bmatrix} \\ &= Q^T F_c \quad (2-12) \end{aligned}$$

وبالنتيجة تصبح العلاقة العامة للنظام كالتالي:

$$\begin{bmatrix} J^T M J & -Q^T \\ Q & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q} \\ F_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J^T (f_g - M J \dot{q}) \\ C \end{pmatrix} \quad (2-13)$$

الطور الثاني: لحظة الصدم في الركبة

تصطدم الساق المتأرجحة بالركبة في هذا الطور وتغفل الركبة. ولما كنا نفترض أن الصدم لحظي وغير مرن ولا ينتج عنه أي ارتداد، يبقى الشرطان في المعادلة (2-10) محققيين بعد الصدم ونكتب:

: [42]

$$Q\dot{q}^+ = 0 \quad (2-14)$$

كما يمكن الحصول على معادلات عزوم الصدم بتكاملة المعادلة (2-9) [42]:

$$M_q \cdot \dot{q}^+ = M_q \cdot \dot{q}^- + Q^T \cdot I_f \quad (2-15)$$

حيث: \dot{q}^- هي السرع في الإحداثيات المعتممة قبل وبعد الصدم بالترتيب.

I_f : هي القوى اللحظية impulse forces المؤثرة على الروبوت في لحظة الصدم، وتعرف بالشكل:

$$I_f = \lim_{t^- \rightarrow t^+} \int_{t^-}^{t^+} F_f dt \quad (2-16)$$

من المعادلين (2-14) و (2-15) نكتب معادلات الصدم بالشكل:

$$\begin{bmatrix} M_q & -Q^T \\ Q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}^+ \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_q \dot{q}^- \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

الطور الثالث: حالة رجل متارجحة مع رجل ساكنة والركبتان مقلبتان

تلغى في هذا الطور درجة الحرية في مفصل الركبة للرجل المتارجحة، ونحصل على جملة معادلات مشابهة لجملة المعادلات (2-13)، ولكن بصياغة مختلفة للمصفوفة اليعقوبية J والمصفوفة M .

الطور الرابع: لحظة اصطدام الرجل المتارجحة مع الأرض

نفترض أنَّ الرجل المستقرة تترك الأرض قبل الصدم مباشرةً وبالتالي تنعدم القوى المطبقة على الرجل من قبل الأرض في لحظة الصدم، وُتستنتج معادلات الصدم بشكل مشابه لحالة الصدم في الركبة.

2-2-2 تطبيق النموذج في بيئة Matlab R2017b

نختار المعاملات التصميمية للنموذج بشكل تقريري بما يتواافق مع الجسم البشري وبناءً على بعض الدراسات السابقة في هذا المجال [37,36]. من أجل ضمان عمومية الحل نجعل جميع القيم

العددية المذكورة في الجدول السابق قيماً بلا واحدة. ونحقق ذلك بتقسيم جميع الأطوال على الطول الكلي للروبوت، وتقسيم جميع الكتل على الكتلة الكلية للروبوت، أما بالنسبة للمقادير المرتبطة بال الزمن فتقسم على المقدار $\sqrt{l/g}$ حيث g هو تسارع الجاذبية الأرضية و l هو الطول الكلي للروبوت. يبيّن الجدول 2-1 القيم المعتمدة في بناء النموذج.

نجّز المعادلات السابقة في بيئة Matlab R2017b باستخدام المكامل الرقمي ode45 في النمذجة. نعتبر اللحظة التي تلي مباشرةً صدم الرجل المتقدمة الأرض وارتفاع الرجل الخلفية عنها لحظة بداية الحركة، ويكون شاعر الحالة الموصف للجملة في هذه اللحظة كالتالي:

الجدول 2-1: القيم العددية المستخدمة في بناء النموذج البسيط.

Parameter	Description	Nominal Values (-)
l	Leg length	1
l_t	Thigh length	0.52
l_s	Shank length	0.48
a_t	Relative distance from center of mass (COM) of the thigh to hip point	0.4
a_s	Relative distance from COM of the shank to knee	0.25
ω_s	Normal distance from COM of the shank to the shank link	0.001
l_f	Distance from the knee to the foot center	0.2
q_f	Angle between the shank and the knee-foot line	0.08
R_f	Foot radius	0.2
m_h	Robot mass	1
m_t	Hip mass	0.7
m_s	Thigh mass	0.10
I_t	Shank mass	0.05
I_s	Thigh moment of inertia	0.003
R_f	Shank moment of inertia	0.001

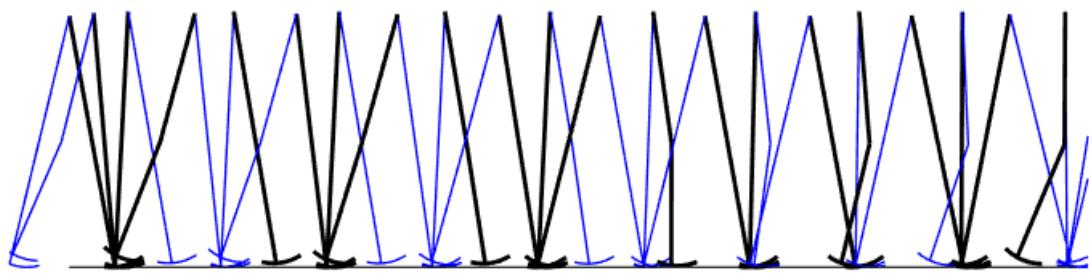
$$dx = \begin{bmatrix} 0 \\ R_f + l_t \cos(\theta_1) + l_f \cos(\theta_1 + q_f) \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_4 \\ -l_t \cos(\theta_1) \dot{\theta}_1 - l_f \cos(\theta_1 + q_f) \dot{\theta}_1 - R_f \dot{\theta}_1 \\ -l_t \sin(\theta_1) \dot{\theta}_1 - l_f \sin(\theta_1 + q_f) \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

حيث تندم في لحظة البداية زاوية وسرعة مفصل الركبة في كلتا الرجلين وتكون الرجلان على تماس مع الأرض، وبالتالي يمكن استنتاج موضع وسرعة نقطة h بالاعتماد على الاسقاط المباشر. إذًا يمكن استنتاج حالة النظام بالاعتماد على ثلاث متحولات فقط هي $[\theta_1, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]$ مع الأخذ بعين الاعتبار الموضع الأفقي الابتدائي للنقطة h الممثلة للجذع في بداية كل خطوة.

بالتجزئ العملي حصلنا على حركة مستقرة للروبوت على منحدر بزاوية ميلان $\beta = 0.01 rad$ انطلاقاً من مجموعة القيم الابتدائية الكافية لتحديد شعاع الحالة:

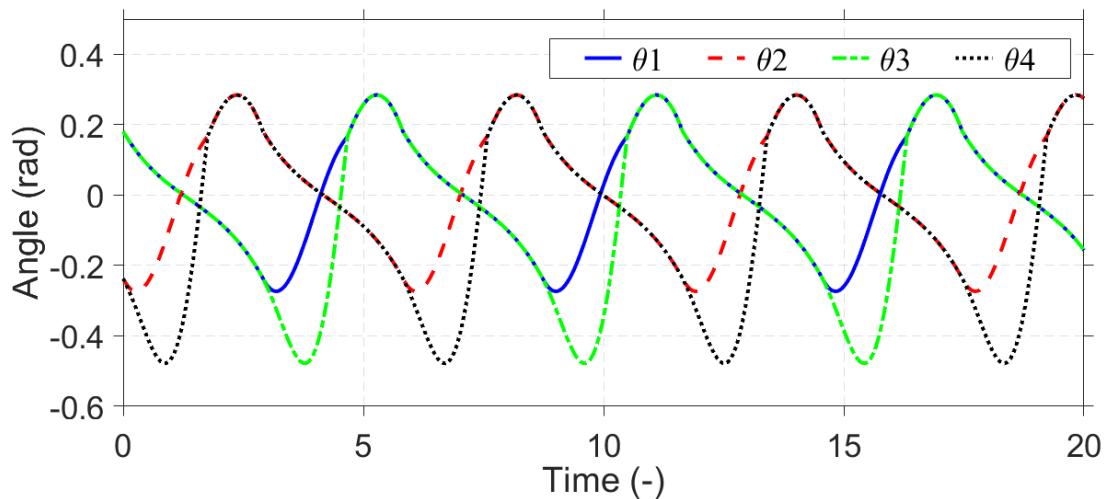
$$[\theta_1, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2] = [0.1808, -0.2312, -0.27] \quad (2-19)$$

يبيّن الشكل 2-5 الحركة المستقرة للروبوت خلال فترة زمنية بمقدار 29، بزمن خطوة حوالي 2.9، ونقصد بزمن الخطوة الفاصل الزمني بين ارتفاع الرجل الخلفية عن الأرض وحتى اصطدامها بها في نهاية طور التأرجح.



الشكل 2-5: النموذج الروبوتي البسيط خلال حركته.

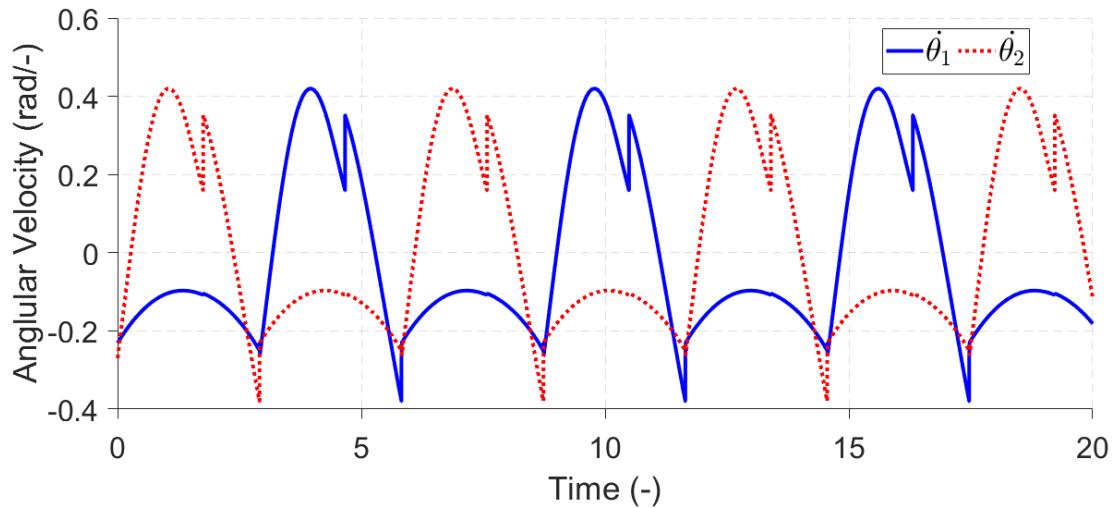
يبيّن الشكل 2-6 منحني زاويي الجذع والركبة لكل من رגלי الروبوت أثناء الحركة.



الشكل 2-6: قيم الزوايا للنموذج البسيط انطلاقاً من الوضع الابتدائي

$$\beta = 0.01 \text{ rad} \quad [\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2] = [0.1808 \quad -0.2312 \quad -0.27]$$

يبيّن الشكل 2-7 السرعة الزاوية للفخذين خلال الحركة، يظهر بوضوح أثر الصدم في الركبة وأثر الصدم مع الأرض.

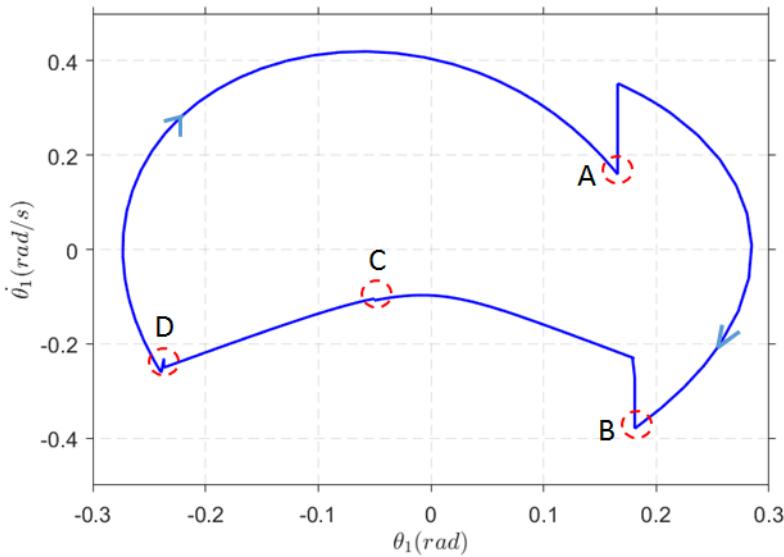


الشكل 2-7: السرع الزاوية لمفصلي الفخذ للنموذج البسيط انطلاقاً من الوضع الابتدائي
 $\beta = 0.01 \text{ rad}$ و بميل منحدر بقيمة $[\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2] = [0.1808, -0.2312, -0.27]$

يبين الشكل 2-8 تغيرات الزاوية والسرعة الزاوية لأحد الرجلين خلال حركتها ونلاحظ أن المسار الناتج عبارة عن حلقة حدية limit cycle، وتظهر فيها لحظات الصدم بشكل عدم استمرارية التابع الموصّف لمسار شعاع الحالة. نميز على هذا الشكل النقاط التالية: (A): لحظة الصدم في الركبة. (B): لحظة صدم قدم هذه الرجل مع الأرض لتصبح هذه الرجل بعد الصدم هي الرجل المستقرة. (C): لحظة الصدم في الركبة الثانية. (D): لحظة صدم القدم الثانية مع الأرض، في هذه النقطة تتبادل الأرجل الأدوار لتصبح الرجل المستقرة متارجحة وبالعكس.

2-2-3 النمذجة باستخدام بيئة Simscape Multibody

نقوم في هذا الجزء ببناء نموذج هندسي Geometrical Model للروبوت باستخدام برنامج Simscape، وبناء نموذج للروبوت باستخدام مكتبة AutoDesk Inventor .Matlab في بيئة Multibody



الشكل 2-8: الحلقة الحدية مرسومة في المستوى $[\dot{\theta}_1, \theta_1]$ انطلاقاً من الوضع الابتدائي . $\beta = 0.01 rad$ وبميل منحدر بقيمة $[\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2] = [0.1808 \quad -0.2312 \quad -0.27]$

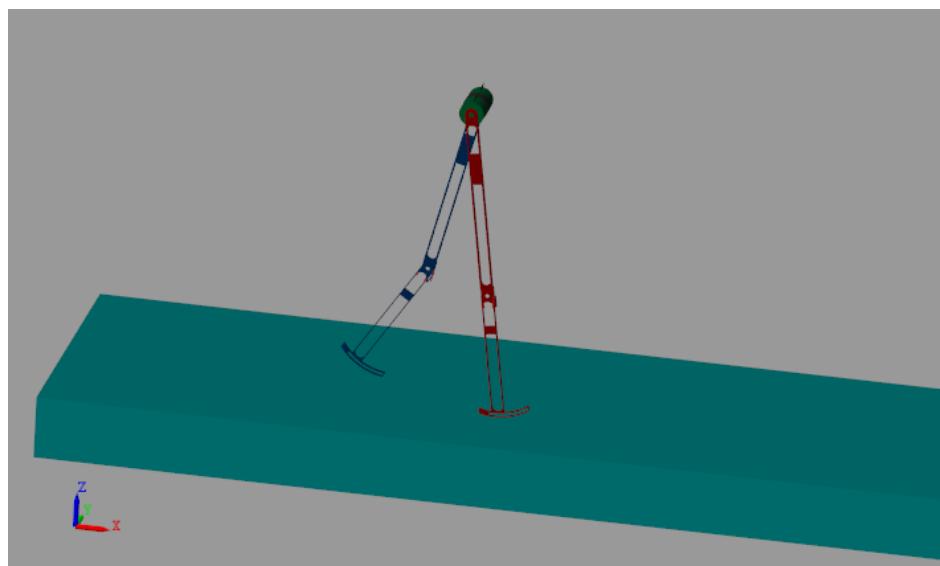
Simscape Multibody 1-3-2-2 بيئة

هي بيئة نمذجة ثلاثة الأبعاد في برنامج Matlab [38]، تستخدم في نمذجة الأنظمة الميكانيكية ثلاثة الأبعاد كالروبوتات وأنظمة تعليق السيارات وأنظمة الهبوط في الطائرات وغيرها. تتم عملية النمذجة باستخدام كتل جاهزة للأجسام والحساسات والروابط والقيود المختلفة وغيرها، كما تقوم البيئة بتشكيل وحل معادلات الحركة ل الكامل النظام الميكانيكي، وهذا مهم جداً في حالة الأنظمة الميكانيكية المعقدة لكونه يجنبنا النمذجة الديناميكية باستخدام المعادلات الرياضية التي قد تكون مستحيلة في بعض الأحيان. تسهل هذه البيئة تطوير أنظمة التحكم وختبارها على الأنظمة الميكانيكية المنشأة، حيث تدعم عدة برامج رسم بمساعدة الحاسوب عملية نقل التصميم الميكانيكي بكافة تفاصيله من حيث القيود والروابط والأجسام إلى هذه البيئة ليتم بعد ذلك بناء التحكم المطلوب عليه.

2-3-2 نمذجة الروبوت باستخدام بيئة Simscape Multibody

الهدف من التصميم في هذه المرحلة هو اختبار النموذج الروبوتي البسيط المعرف في الفقرة (1-2) بالاستعانة بمكتبة Simscape Multibody، والمقارنة بين طريقي النمذجة بهدف اختيار الطريقة الأمثل لاعتمادها في دراستنا.

نقوم بناء نموذج هندسي للروبوت انطلاقاً من الأبعاد المبينة في الجدول 2-1 باستخدام برنامج Autodesk Inventor. نقل هذا التصميم إلى برنامج Matlab R2017b بالاعتماد على Simscape Multibody، ونمذج التماس مع الأرض والقفل الميكانيكي للركبة باستخدام مكتبة Simscape Multibody Contact Forces Library v3.9. نحصل بالنتيجة على حركة مستقرة للروبوت في الموضع الثنائي بعد من غير تفعيل وبالاعتماد فقط على الجاذبية الأرضية، وبأداء مشابه للأداء في حالة النمذجة باستخدام المعادلات الرياضية. يبيّن الشكل 2-9 النموذج البسيط الذي تم بناؤه.

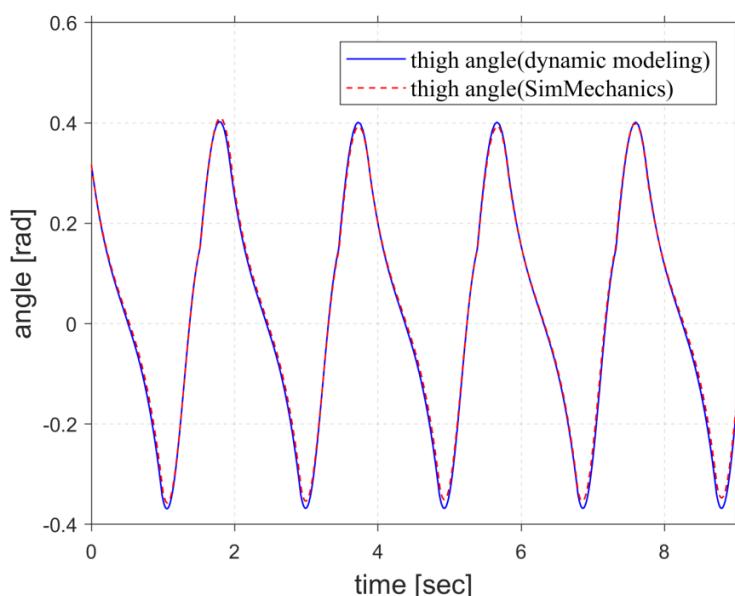


الشكل 2-9: النموذج البسيط في بيئة Simscape Multibody

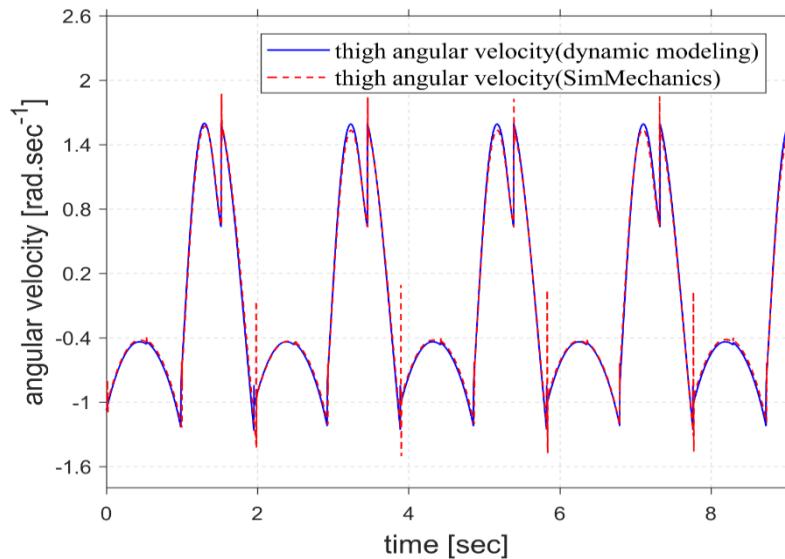
2-4-2 مقارنة بين طريقي النمذجة

نقلنا النتائج التي حصلنا عليها من نمذجة الروبوت بطريقة المعادلات الديناميكية إلى النمط البعدى لها، وقارنا النتائج بين طريقي النمذجة من أجل نفس المعاملات. يظهر الشكل 2-10 تطابقاً في

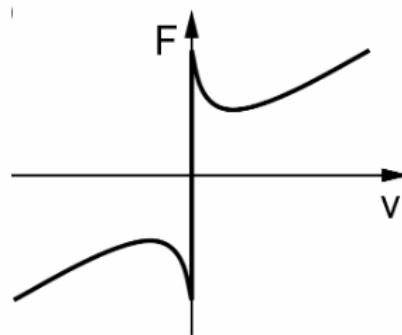
سلوك زاوية الخصر أثناء الحركة، بينما نجد اختلافاً في سلوك السرع في لحظات الصدم كما يبيّن الشكل 2-11 وذلك عائد لاختلاف نمذجة الصدم بين الطريقتين، حيث فرضنا في طريقة النمذجة الأولى أنّ الصدم لحظي لا ينتج عنه أي ارتداد أو انزلاق. بينما في حالة النمذجة باستخدام بيئه Multibody Simscape ويندرج التماس المعامل لاتجاه الحركة بشكل مرن (نابض - محمد)، ويندرج التماس وفق اتجاه الحركة بمنحنى [39] Stribeck المبيّن في الشكل 2-12. يتضمن النموذج في هذه الطريقة احتكاك كولومب Coulomb friction، إضافةً إلى التخادم الديناميكي (زيادة التخادم مع زيادة السرعة)، وكذلك الحالة التي ينخفض فيها التخادم مع زيادة السرعة ضمن مجال محدد من السرعات المنخفضة. عموماً فالاختلاف في نمذجة الصدم بين الطريقتين لا يؤثّر بشكل كبير على أداء الروبوت، وهذا ما يظهره تغيير زاوية الفخذ أثناء الحركة، وبالتالي يمكن أن نعتبر أنّ فرضيّة الصدم بدون ارتداد أو انزلاق كافية لنمذجة سلوك الصدم.



الشكل 2-10: مقارنة تغيير زاوية الفخذ بين طريقتي النمذجة المعتمدتين.



الشكل 2-11: مقارنة السرعة الزاوية للفخذ بين طرفي النمذجة.



الشكل 2-12: نموذج Stribeck في التخادم.

يبيّن الجدول 2-2 مقارنةً في الأداء بين الطريقيتين وفق مجموعة مختارة من معاملات الأداء. لما كان الهدف المطروح للمشروع يتعلق بدراسة معاملات التصميم الميكانيكي ودراسة طرق تحكم قد تستلزم استخدام خوارزميات تكرارية بزمن تنفيذ طويل، فقد ركزنا على اختيار طريقة قابلة للتعديل بشكل سهل وزمن تنفيذ قصير. يُظهر الجدول 2-2 أنَّ الطريقة الأفضل هي طريقة النمذجة باستخدام المعادلات الديناميكية مع تقسيم الحركة إلى عدة أطوار. تكمن الصعوبة الأساسية في هذه الطريقة في بناء النموذج ولكن بمجرد تجاوز هذه المرحلة تصبح هذه الطريقة الأفضل من كل النواحي.

الجدول 2-2: مقارنة بين أداء النمذجة الديناميكية باستخدام المعادلات الرياضية والنمذجة باستخدام بيئة Simscape Multibody

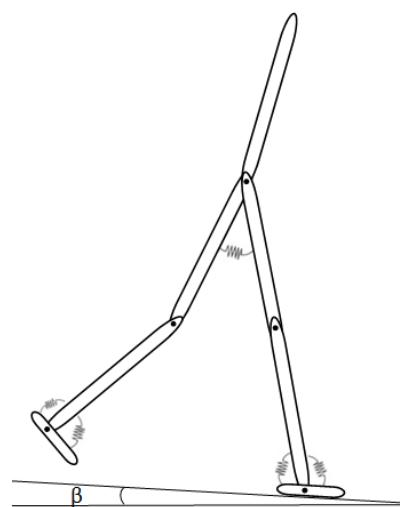
عنصر المقارنة	المعادلات الديناميكية	Simscape Multibody	الملحوظات
سهولة البناء	صعبة	متوسطة	تزداد صعوبة الوصول إلى المعادلات الديناميكية الحاكمة كلما ازداد عدد درجات حرية النموذج.
زمن المحاكاة	صغير	كبير	تطلب الأمر أكثر من عشرة أضعاف الزمن اللازم لنمذجة نفس العدد من الخطوات.
إمكانية تعديل التصميم	بسيطة	صعبة	يتطلب تعديل معاملات التصميم الميكانيكي كالأطوال ومراكم العطالة وغيرها في حالة النمذجة في مكتبة Simscape Multibody وقناً كبيراً كما أن التعديل غير ممكن أثناء التطبيق، وهذا يمنعنا من دراسة أمثلة معاملات التصميم الميكانيكي، بينما في حالة النمذجة الأخرى فالتعديل بسيط وسهل.
إمكانية تطبيق خوارزميات التحكم	متوسطة	متوسطة	يتطلب بناء أي تحكم في حالة النمذجة بالمعادلات القدرة على نمذجته باستخدام معادلات ومن ثم المتكاملة باستخدام أحد المكاملات الرقمية. بينما تم التمذجة باستخدام مكتبة Simscape Multibody بواسطة كتل جاهزة مما يجعل البناء أبسط ولكنه يحد من إمكانية وبساطة التعديل.

2-3 النموذج المعتمد على سبعة أجسام وست درجات حرية

أنجزنا في الفصل السابق نمذجة روبوت بسيط بأربعة أجسام، ويعتبر هذا النموذج البداية التي بدأنا منها الدراسات على الروبوتات ثنائية الأرجل التي تعتمد على ديناميكتها فقط في أداء الحركة [13]. بعد ذلك توالت الإضافات والتعديلات على التصميم البسيط المقترن فتم إضافة جسم علوي للروبوت وإثبات قدرته على تحسين الحركة من ناحية زيادة السرعة والاستقرار [14,15]، كما تم دراسة أثر الأقدام على الحركة وبناء قدم مسطحة عوضاً عن المقوسة [17].

نعتمد في دراستنا التالية نموذجاً لروبوت ثبائي الأرجل مشابه للنموذج المستخدم في [25] آخذين بعين الاعتبار الملاحظات والدراسات سابقة الذكر التي تمت على النماذج غير المفعّلة. يتكون هذا النموذج (الشكل 2-13) من سبعة أجسام (جسم علوي – فخذين – ساقين – قدمين مسطحتين) مع خصر بشكل كتلة نقطية وست درجات حرية، كما يحتوي على نابض دوراني في مفصل الكاحل

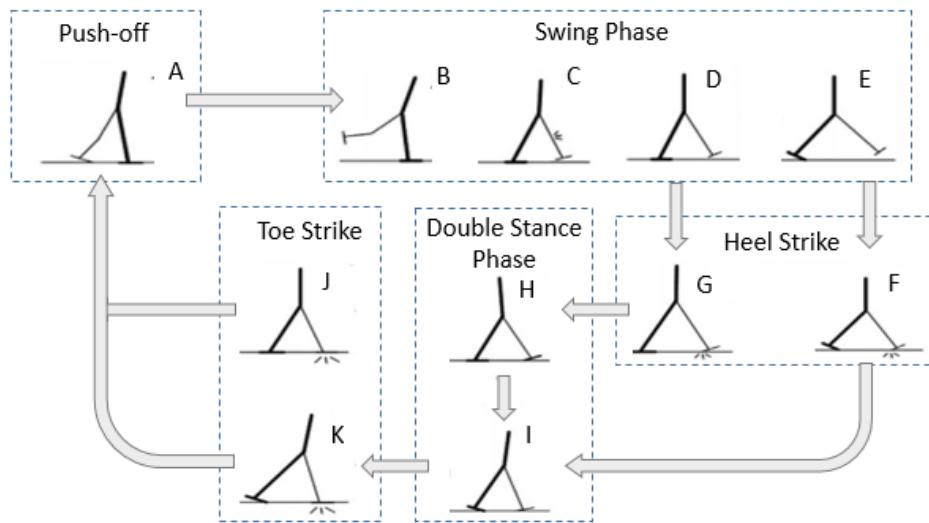
ونابض دوري يربط بين الفخذين، حيث دلت الدراسات على مشابهة حركة مفصل الكاحل للإنسان لحركة نابض دوري [40, 41]. ترتبط الساق مع الفخذ عن طريق مفصل الركبة، كما يرتبط الفخذان مع بعضهما ومع الجسم العلوي بمفصل في منطقة الخصر، ونضيف كتلة نقطية في منطقة الخصر تمثل الحوض. نقوم بدايةً في هذا الفصل بتحديد أطوار الحركة لهذا النموذج، ومن ثمّ نقوم بإيجاد العلاقات الديناميكية الحاكمة لحركته على منحدر مائل في كل طور من أطوار الحركة بشكل مشابه لدراسة النموذج البسيط. ننقل بعد ذلك هذه النمذجة الرياضية إلى بيئة Matlab R2017b.



الشكل 2-13: نموذج الروبوت بسبعة أجسام وست درجات حرية.

1-3-2 أطوار الحركة

يمر الروبوت بعدة أطوار وفقاً لأطوار أرجله، فنسمي الحالة التي تكون فيها كلتا الرجلين على تماس مع الأرض بالطور ثنائي الاستقرار double-stance phase، في حين نسمّي الطور الذي تكون فيه أحد الرجلين متارجحة بطور التأرجح swing phase. يتمكن الروبوت من السير بشكل صحيح إذا تسلسلت الأطوار السابقة بشكل مناسب، ويمكن أن تتم حركة السير وفق خمسة سيناريوهات مختلفة بناءً على هذه التسلسلات، حيث تلعب قيم ثوابت صلابة النواص في المفاصل الدور الرئيسي في تحديد أي السيناريوهات يظهر أثناء الحركة. درست السيناريوهات السابقة بالتفصيل من قبل [42] Huang.



الشكل 2-14: تسلسل حركات المشي الممكنة لنموذج الروبوت بسبعة أجسام.

نذكر خلال دراستنا بهدف التبسيط على سيناريوهين فقط (الشكل 2-14) وهو السيناريوهان الأكثر شيوعاً في حركة المشي عند البشر [42]. يوصّف السيناريو الأول بالتسلسل $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow I \rightarrow K \rightarrow A$ بينما يوصّف الثاني بالتسلسل $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow K \rightarrow A$. نستعرض فيما يلي تسلسل الأطوار في هذين السيناريوهين بشيء من التفصيل:

- **الدفع بالقدم نحو الأعلى push-off phase A:** يتحرك الروبوت حول نقطتي تماس في هذا الطور (كعب الرجل الأمامية وإصبع الرجل الخلفية) وينتهي هذا الطور عند ارتفاع الرجل الخلفية عن الأرض.
- **طور التأرجح مع الركبة حرفة B:** يبدأ هذا الطور مع انعدام قوى التماس الشاقولية للرجل الخلفية مع الأرض، ونحرّر فيه مفصل الركبة لتصبح الساق حرفة الحركة. يستمر هذا الطور حتى انعدام الزاوية النسبية بين الساق والفخذ في الرجل المتأرجحة، لتنتقل بعدها إلى الطور التالي.

- **الاصدم في الركبة C:** عند وصول الساق إلى استقامة الفخذ تظهر حالة صدم. نفرض أن هذا الصدم هو صدم لحظي غير مرن، يقيّد بعده مفصل الركبة حتى بداية طور التأرجح التالي لهذه الرجل.
- **التأرجح مع الركبة مقيدة D-E:** في هذا الطور تصبح زاوية وسرعة دوران الساق بالنسبة للشاقول متساوية لمثيلاتها في الفخذ.

يمكن أن يرتفع كعب الرجل المستقرة قبل اصطدام الرجل المتراجحة مع الأرض، نسمى حالة الرفع هذه بالرفع المتقدم premature heel rise [9]. نقلنا حالة الرفع المتقدم إلى السيناريو الثاني للحركة، بينما يبقينا استمرار الرجل الخلفية في تماسها الكامل مع الأرض حتى اصطدام الكعب مع الأرض ضمن السيناريو الأول.

- **اصدم كعب الرجل الأمامية F:** وفيه يصدム كعب الرجل الأمامية الأرض.
- **الطور ثانوي الاستقرار H-I:** يكون فيه كعب الرجل الأمامية مع إصبع الرجل الخلفية أو كامل الرجل الخلفية على تماس مع الأرض، ويتحرك الروبوت حول نقاط التماس حتى لحظة انعدام الزاوية بين القدم الأمامية والأرض، لتنتقل بعدها إلى طور التصادم التالي.
- **طور اصطدام الإصبع مع الأرض J:** يصدム فيه إصبع الرجل المتقدمة الأرض.
- يضمن تكرار الأطوار بالتسلسل السابق الحصول على حركة المشي وفق السيناريو المعتمد.

2-3 النمذجة الديناميكية

نفرض بدايةً وبشكل مشابه لدراسات سابقة [42,43,9] مجموعة من القيود على النموذج المعتمد بهدف تبسيط الدراسة. هذه القيود هي كالتالي:

- لا يخضع الروبوت أثناء حركته إلى تشوّهات تؤدي إلى تغيير في المعاملات التصميمية له. تشمل هذه التغييرات: كتل ومراكز عطالة وعزوم عطالة وأطوال الأجسام المشكّلة له.
- الاحتكاك بين الأرض وقدم الروبوت كافٍ بحيث لا يحدث أي انزلاق أثناء الحركة.

- تصادم الروبوت مع الأرض خلال حركته هو تصادم لحظي غير من بحث لا ينتج عنه أي انزلاق أو ارتداد.
- يتم تأمين الطاقة اللازمة لحركة الروبوت من خلال حركته على منحدر مائل بزاوية محددة.
- يخضع الجسم العلوي لقيود ديناميكية بحيث يبقى محافظاً على وضعية وسطية بين الرجلين أثناء الحركة.
- نفرض أن ثابت صلابة النابض في الكاحل قيمتين مختلفتين أثناء الحركة. القيمة الأولى عند بداية تماس الرجل مع الأرض وحتى انعدام زاوية هذه الرجل مع الشاقول وهي نقطة توازن النابض، وتكون قيمة النابض في هذا الطور منخفضة تجنبًا لارتداد الرجل المتصادمة عن الأرض [9]. في حين يأخذ ثابت الصلابة قيمته الثانية عند كل أطوار الحركة ماعدا حالة الهبوط سابقة الذكر وهنا تكون قيمة ثابت الصلابة كبيرة نسبيًا مقارنة مع الحالة السابقة. لا يضيف تعديل هذه الثوابت أي طاقة إلى النموذج لأن التعديل بين قيم ثابت الصلابة في الكاحل يتم عند نقطة التوازن، ونهمل الطاقة اللازمة لتعديل هذه الثوابت خلال الحركة، كما نفرض أن الانتقال بين ثابت الصلابة يتم بشكل لحظي.

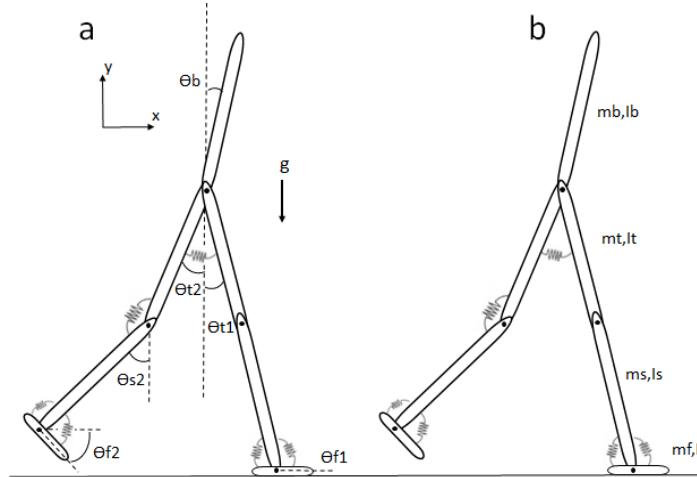
نحدد بدايةً المعاملات التصميمية لهذا النموذج مع مجموعة من القيم المأخوذة بشكل تقريري للقيم المقابلة في جسم الإنسان [44]، ويبيّن الجدول 3-2 المعاملات التصميمية للروبوت مع قيمها. نعتمد جميع المعاملات بشكلها غير البديهي بهدف جعل الدراسة عمومية قدر الإمكان بشكل مشابه لحالة النموذج البسيط.

نوصّف النموذج باستخدام الإحداثيات الإقليدية \mathbf{x} Euclidean coordinates، حيث نعتبر أن المحور \mathbf{x} موازٍ للمنحدر الذي يتحرك عليه الروبوت، والمحور \mathbf{y} عائد لاتجاه الحركة وباتجاه الأعلى، ويتم تمثيل كل جسم link باستخدام إحداثيات مركز عطالته وزاويته بالنسبة للشاقول من أجل الفخذ والساقي والجسم العلوي، وزاويته بالنسبة للمنحدر المائل من أجل القدمين.

يكون شعاع الإحداثيات الإقليدية للنموذج:

$$x = [x_h, y_h, x_b, y_b, \theta_b, x_{t1}, y_{t1}, \theta_{t1}, x_{s1}, y_{s1}, \theta_{s1}, x_{f1}, y_{f1}, \theta_{f1}, x_{t2}, y_{t2}, \theta_{t2}, x_{s2}, y_{s2}, \theta_{s2}, x_{f2}, y_{f2}, \theta_{f2}] \quad (2-20)$$

دلالة الرموز يوضّحها الشكل 2-15.



الشكل 2-15: نموذج الروبوت بسبعة أجسام المعتمد مع الرموز المستخدمة.

كما يمكن توصيف النموذج باستخدام الإحداثيات المعمّمة generalized coordinates:

$$q = [x_h, y_h, \theta_b, \theta_{t1}, \theta_{s1}, \theta_{f1}, \theta_{t2}, \theta_{s2}, \theta_{f2}] \quad (2-21)$$

قد تختلف الإحداثيات السابقة قليلاً بين أطوار الحركة المختلفة، فمثلاً تكون الركبة مقلوبة من أجل الطور الذي تكون فيه كلتا الرجلين على تماس مع الأرض وبالتالي تكون زاوية الساق مساوية لزاوية الفخذ.

نكتب الإحداثيات الإقليدية بدلاله الإحداثيات المعمّمة بالشكل:

$$x = x(q) \quad (2-22)$$

وبالاشتقاق:

$$\dot{x} = \frac{\partial x}{\partial q} \dot{q} = J \dot{q} \quad (2-23)$$

حيث تمثل J المصفوفة العقوبية التي تربط السرع في الإحداثيات الإقليدية بالسرع مكتوبة في الإحداثيات المعتمدة.

الجدول 2-3: معاملات التصميم المستخدمة في حالة نموذج سبعة أجسام وقيمها الإسمية.

Parameter	Description	Nominal Values (-)
l	Leg length	1
l_t	Thigh length	0.5
l_s	Shank length	0.5
l_f	Foot length	0.22
l_b	Distance from COM of body to hip point	0.3
a_t	Relative distance from COM of thigh to hip point	0.5
a_s	Relative distance from COM of shank to knee joint	0.5
a_f	Relative distance from COM of foot to toe point	0.5
l_{ft}	Distance from ankle joint to toe point	0.143
l_{fh}	Distance from ankle joint to heel point	0.077
m	Robot mass	1
m_h	Hip mass	0.13
m_b	Upper body mass	0.55
m_t	Thigh mass	0.10
m_s	Shank mass	0.045
m_f	Foot mass	0.015
I_b	Body moment of inertia	0.013
I_t	Thigh moment of inertia	0.004
I_s	Shank moment of inertia	0.003
I_f	Foot moment of inertia	0.0002
β	Slope angle	0.046
K_{fa}	Ankle spring stiffness during landing phase of the leg	0.05
K_{fb}	Ankle spring stiffness during push off and falling phase of the leg	0.265
K_h	Hip spring stiffness	0.0352

نعرف مصفوفة القيود ($\xi(q)$) التي توصّف القيود الناتجة عن تماس الروبوت مع الأرض والقيد المفروض على حركة الجسم العلوي. تختلف المصفوفة السابقة بين أطوار الحركة المختلفة باختلاف شروط التماس مع الأرض، فمثلاً تكتب هذه المصفوفة في حالة طوري التأرجح -بفرض أنّ الرجل leg1 هي الرجل المستقرة في هذا الطور - بالشكل:

$$\xi(q) = \begin{pmatrix} \theta_b - 0.5(\theta_{t1} + \theta_{t2}) \\ x_h + l \cdot \sin(\theta_{t1}) \\ y_h - l \cdot \cos(\theta_{t1}) - l_{f1} \cdot \sin(\theta_{f1}) \\ y_h - l \cdot \cos(\theta_{t1}) + l_{f1} \cdot \sin(\theta_{f1}) \end{pmatrix} \quad (2-24)$$

تعني القيود السابقة أنّ الرجل المستقرة خلال هذين الطورين تبقى على تماس كامل مع الأرض بدون انزلاق، حيث تتحقق شروط التماس بوضع $\xi(q) = 0$.

تمثّل قوى التماس مع الأرض في هذه الحالة بمركبة وفق المحور X، ومركبتين وفق المحور الشاقولي Y وفي حال أصبحت قيم أحد هذه المركبات الشاقولية مساوية أو أصغر من الصفر يلغى القيد الموقّف لهذه المركبة ويعاد الحساب بعد حذف هذا القيد من مصفوفة القيود السابقة.

يمكن الحصول على معادلات الحركة في كل طور انطلاقاً من مبدأ العمل الافتراضي بشكل مشابه لمذكرة الروبوت البسيط:

$$M_q \cdot \ddot{q} = F_q + T^T F_f \quad (2-25)$$

$$\xi(q) = 0 \quad (2-26)$$

حيث M_q هي مصفوفة الكتل في الإحداثيات المعمّمة، وتساوي:

$$M_q = J^T M J \quad (2-27)$$

M مصفوفة الكتل في الإحداثيات الإقليدية:

$$M = diag([m_h, m_h, m_b, m_b, I_b, m_t, m_t, I_t, m_s, m_s, I_s, m_f, m_f, I_f, m_t, m_t, I_t, m_s, m_s, I_s, m_f, m_f, I_f]) \quad (2-28)$$

F_q هي القوى الخارجية الفعالة مكتوبة في الإحداثيات المعمّمة:

$$F_q = J^T F - J^T M \frac{\partial J}{\partial q} \dot{q} \dot{q} \quad (2-29)$$

حيث F هي القوى الخارجية المؤثرة على الروبوت والناتجة عن التواضع أو المحركات في الروابط وقوى الثقالة مكتوبة في الإحداثيات الإقليدية.

نكتب المعادلة (2-26) بالشكل:

$$T\ddot{q} + \frac{\partial(T\dot{q})}{\partial q} \dot{q} = 0 \quad (2-30)$$

من المعادلين (2-25) و (2-30) نكتب المعادلات العامة الموصفة للحركة:

$$\begin{bmatrix} M_q & -T^T \\ T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ F_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_q \\ -\frac{\partial(T\dot{q})}{\partial q} \dot{q} \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

تحمل معادلات الحركة في كل الأطوار الصيغة السابقة ذاتها ولكن تختلف عناصر هذه المصفوفات من طور إلى آخر.

فرضنا سابقاً أن الصدم مع الأرض هو صدم لحظي غير مرن لا ينتج عنه أي انزلاق أو ارتداد وبالتالي يتحقق النموذج مصفوفة القيود (q) بعد الصدم [42]، ويمكن أن نكتب:

$$\frac{\partial \xi}{\partial q} \dot{q}^+ = 0 \quad (2-32)$$

كما يمكن الحصول على معادلات عزوم الصدم بتكاملة المعادلة (2-25) [42]:

$$M_q \dot{q}^+ = M_q \dot{q}^- + T^T I_f \quad (2-33)$$

حيث: \dot{q}^- هي السرع في الإحداثيات المعتممة قبل وبعد الصدم بالترتيب.

I_f : هي القوى اللحظية impulse forces المؤثرة على الروبوت في لحظة الصدم، وتعرف بالشكل:

$$I_f = \lim_{t^- \rightarrow t^+} \int_{t^-}^{t^+} F_f dt \quad (2-34)$$

من المعادلين (2-32) و (2-33) نكتب معادلات الصدم بالشكل:

$$\begin{bmatrix} M_q & -T^T \\ T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}^+ \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_q \dot{q}^- \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

2-3-3 تابع الخطوة والنقطة الثابتة

يمكن توصيف خطوة الروبوت بتابع $f(u)$ يسمى تابع الخطوة stride function [9] الذي يربط القيم الابتدائية لشاع الحالة للروبوت في بداية الخطوة $(q, \dot{q})_n$ مع شاع الحالة في بداية الخطوة التالية $(q, \dot{q})_{n+1}$. نعتبر في حالتنا أنّ بداية الخطوة هي اللحظة التي تلي مباشرةً رفع الرجل الخلفيّ عن الأرض مع بداية طور التأرجح. يمكن الحصول على تابع الخطوة من معادلات الحركة والصدم الموصفة في فقرة ديناميك الحركة ونكتب:

$$u_{n+1} = f(u_n) \quad (2-36)$$

ينخفض عدد المعاملات المستقلة لشاع الحالة في بداية الخطوة المعتبرة إلى أربعة، وهي كالتالي:

$$u_{n+1} = [\theta_{t1}, \theta_{t2}, \dot{\theta}_{t1}, \dot{\theta}_{t2}] \quad (2-37)$$

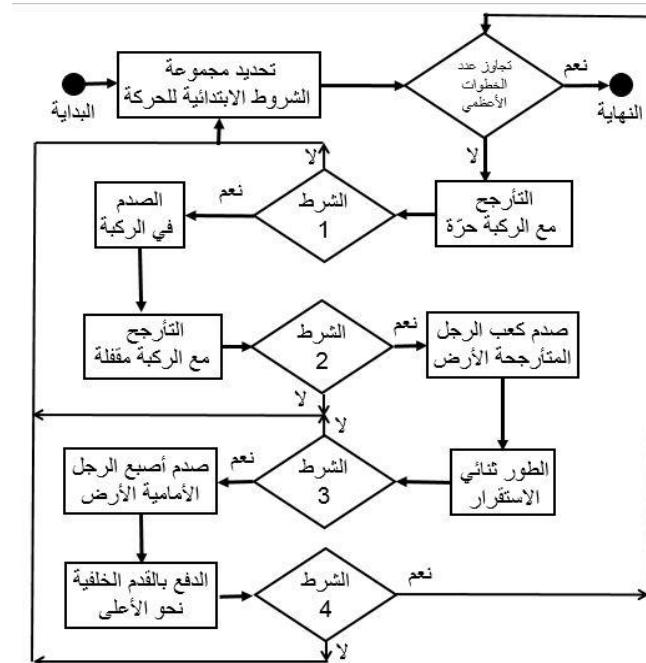
ونستنتج بقية معاملات شاع الحالة بشكل مباشر كما تبيّن المعادلات التالية:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_b = (\theta_1 + \theta_2)/2 \\ \theta_{f1} = \theta_{t1} \\ \theta_{f2} = \dot{\theta}_{f2} = 0 \\ \dot{\theta}_{f1} = \dot{\theta}_{t1} \\ \dot{\theta}_b = (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)/2 \end{array} \right. \quad (2-38)$$

تنتج هذه المعادلات من القيود الديناميكية المفروضة على حركة الجسم العلوي، كما نفرض أنّ قدم الرجل المتأرجحة تبقى خلال شوط التأرجح معameda لساقها وذلك لتبسيط الدراسة.

Matlab 4-3-2 النمذجة باستخدام بيئة

تمت النمذجة الحاسوبية في بيئة Matlab 2017b بالاعتماد على المعادلات المشروحة في فقرة النمذجة الديناميكية، ويبيّن الشكل 16-2 المخطط التدفقي للنمذجة الحاسوبية لخطوة الروبوت، حيث تبدأ الخطوة كما ذكرنا سابقاً من بداية طور التأرجح مع الركبة حرّة بمجموعة من الشروط الابتدائية المحددة مسبقاً، ويتم نمذجة كل طور من الأطوار بشكل مستقل والانتقال من الطور إلى الطور الذي يليه عند تحقق الشروط المناسبة لذلك وهذه الشروط هي كالتالي:



الشكل 2-16: المخطط التدفقي للنمذجة الحاسوبية لحركة الروبوت.

الشرط الأول: الانتقال من طور التأرجح مع الركبة حرّة إلى طور التصادم في الركبة، ويتتحقق هذا الشرط عندما تتعذر الزاوية النسبية بين فخذ وساق الرجل المتأرجحة.

الشرط الثاني: الانتقال من طور التأرجح إلى طور تصادم كعب الرجل الأمامية مع الأرض، ويتتحقق هذا الشرط عندما ينعدم ارتفاع كعب القدم عن الأرض.

الشرط الثالث: الانتقال من الطور ثانوي الاستقرار إلى طور تصادم إصبع القدم مع الأرض، ويتتحقق ذلك عندما تنعدم زاوية القدم الأمامية مع الأرض.

الشرط الرابع: الانتقال من طور الدفع بالقدم نحو الأعلى إلى طور التأرجح، ويتحقق هذا الشرط عندما تندفع قوى التماس الشاقولية تحت قدم الرجل الخلفية مما يتطلب إلغاء هذا التماس.

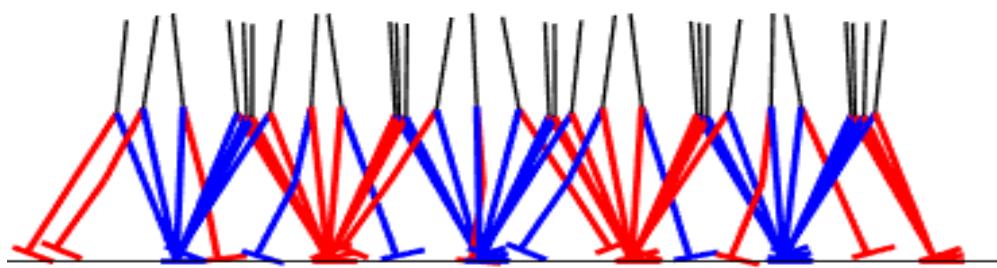
في حال عدم تحقق أي من هذه الشروط نعتبر أن هذه الحالة هي حالة فشل للروبوت، ونعتبر أن الحركة اعتباراً من الشروط الابتدائية المأخوذة غير ممكنة، ونعود إلى نقطة البداية بمجموعة من الشروط الابتدائية الجديدة، وفي حال تتحقق جميع الشروط نعود إلى نقطة البداية ونتابع من مجموعة الشروط التي تحددها نهاية الخطوة السابقة، حتى يسير الروبوت عدد خطوات أعظمي محدد مسبقاً.

ندرس إضافةً إلى الشروط السابقة قوى التماس الشاقولية مع الأرض في نقط التماس خلال كل لحظة، وفي حال كان التماس بقيمة سالبة خلال أي لحظة يصبح قيد التماس غير متحقق ويستلزم ذلك إلغاء هذا القيد ونعتبر ذلك حالة فشل في حال تطلب ذلك خروجاً عن السيناريوهين الم موضوعين للحركة والموصفين في الفقرة (1.2).

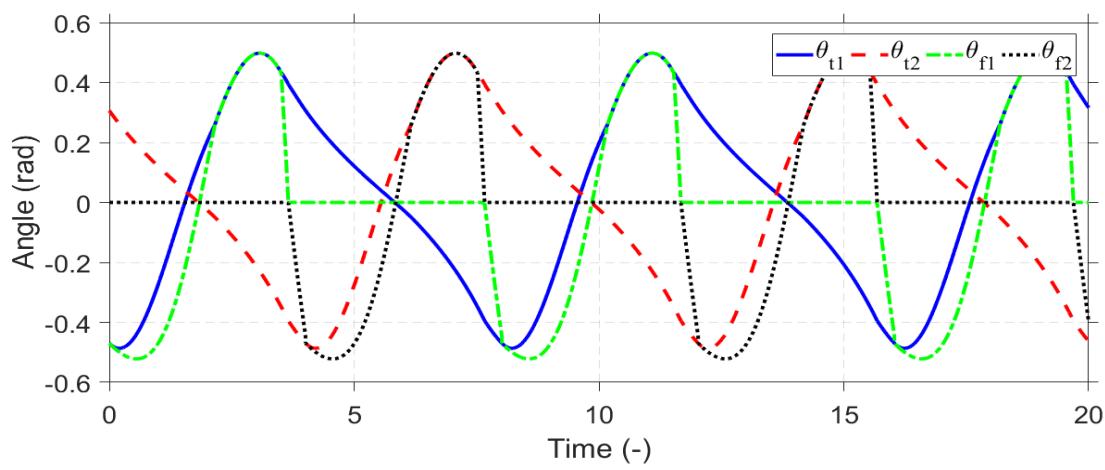
يبين الشكل 2-17 حركة نموذج الروبوت بالقيم الإسمية المبينة في الجدول 2-3 خلال خمس خطوات متتالية انطلاقاً من النقطة الثابتة:

$$u_0 = [-0.4696 \quad 0.3065 \quad -0.1690 \quad -0.2314]$$

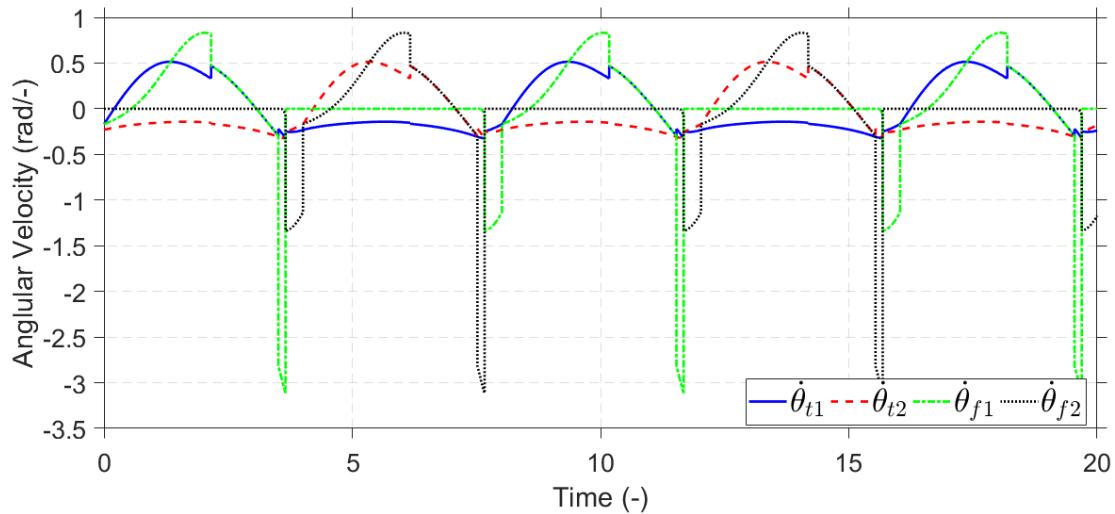
يبين الشكل 2-18 تغير زاوية كل من الرجلين الساقنة والمتأرجحة والقدمين الموافقين خلال أطوار الحركة المختلفة من أجل خمس خطوات متتالية، ونلاحظ فيه تساوي زاوية القدم مع الفخذ في طور التأرجح للرجل الموافقة وانعدام زاوية القدم في حالة الرجل الساقنة، ويبين الشكل 2-19 السرع الزاوية الموافقة ويظهر فيه بوضوح أثر الصدم في الركبة ومع الأرض بشكل عدم استمرارية في منحني السرع. يعرض الشكل 2-20 مسقط الحلقة الحدية في المستوى المعرف بزاوية الرجل الأولى وسرعتها الزاوية، تتكرر هذه الحلقة الحدية مع تالي الخطوات حيث يعود الروبوت في نهاية كل خطوة إلى الوضع الابتدائي له الموصف بالنقطة a.



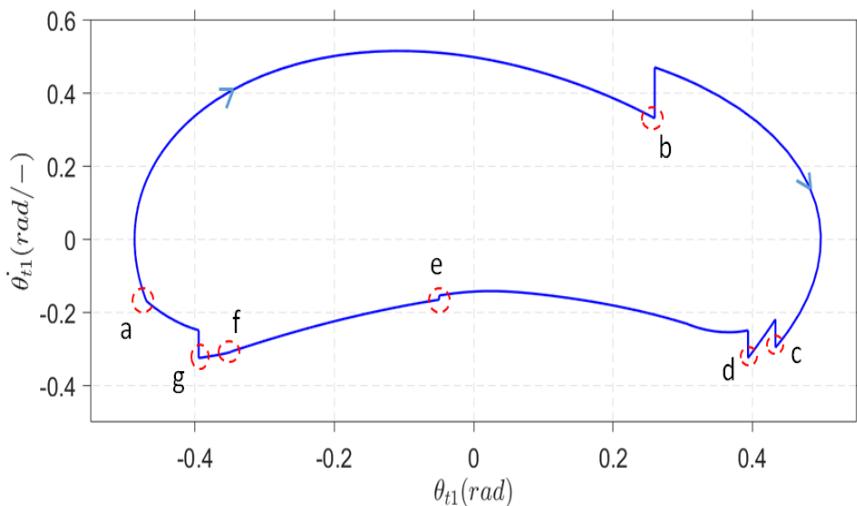
الشكل 2-17: حركة نموذج الروبوت بالقيم الإسمية.



الشكل 2-18: تغيير زوايا رجلي الروبوت وقدميه خلال خمس خطوات متتالية.



الشكل 2-19: السرع الزاوية لرجل الروبوت والقدمين خلال خمسة أطوار متتالية.



الشكل 2-20: مسقط الحلقة الحدية للروبوت في المستوى المعرف بزاوية الرجل الأولى وسرعتها، يظهر الشكل النقاط الأساسية من مراحل الحركة وهي: (a) بداية طور التأرجح للرجل 1، (b) الصدم في ركبة الرجل 1، (c) الصدم في كعب الرجل 1، (d) الصدم في إصبع الرجل 1، (e) الصدم في ركبة الرجل 2، (f) الصدم في كعب الرجل 2، (g) الصدم في إصبع الرجل 2.

4-2 الخلاصة

قمنا في هذا الفصل بدراسة نمذجة الروبوتات المستوية ذات الرجلين، حيث قارنا بين طريقتين في النمذجة بالاستعانة بنموذج بسيط مكون من أربعة أجسام. تقوم الطريقة الأولى على استخدام المعادلات الديناميكية مع تقسيم الحركة إلى عدّة أطوار وتمثل لحظات الصدم في الركبة ومع الأرض بصدم لحظي غير مرن لا ينتج عنه أي ارتداد أو انزلاق؛ بينما تقوم الطريقة الثانية على استخدام مكتبة Simscape Multibody في بيئة Matlab. أعطت كلا الطريقتين نتائج متقاربة فيما يخص حركة الروبوت الناتجة ولكن تفوقت الطريقة الأولى من حيث زمن المحاكاة ومرنة تعديل معاملات النموذج أثناء العمل. بناءً على نتائج المقارنة بين طريقتي النمذجة قمنا ببناء نموذج روبوتي بسبعة أجسام وست درجات حرية باستخدام الطريقة الأولى وحصلنا على حركة دورية مستقرة للروبوت، نعتمد هذا النموذج في دراساتنا في الفصول التالية.

الفصل الثالث

دراسة تصميمية للروبوتات ثنائية

الأرجل غير المفعة

نسعى في هذا الفصل إلى إجراء دراسة تصميمية للروبوتات المعتمدة على الدينامييك الداخلي بهدف اختيار معاملات التصميم الأمثلية. تستند الدراسة على مجموعة من معاملات الأداء ويكون الهدف اختيار مجموعة المعاملات التصميمية التي تعطي أفضل أداء للروبوت وفق المعايير السابقة.

1-3 مقدمة

قمنا في الفصل السابق بنمذجة روبوت بسبعة أجسام وست درجات حرية بالاعتماد على المعادلات الرياضية وبتقسيم الحركة إلى عدة اطوار، وختبرنا أداء النموذج من أجل مجموعة من المعاملات التصميمية المأخوذة بشكل مشابه لدراسات مرجعية سابقة.

نسعى في هذا الفصل إلى إجراء دراسة تصميمية للنموذج الروبوتي السابق تقودنا إلى اختيار معاملات التصميم الأمثلية. تستند الدراسة على مجموعة من معاملات الأداء ويكون الهدف اختيار مجموعة المعاملات التصميمية التي تعطي أفضل أداء للروبوت وفق معايير معينة.

بناءً على ما سبق نجد أنه يمكن التعامل مع مسألة دراسة المعاملات التصميمية على أنها مسألة أمثلة لمجموعة معاملات وفق تابع كلفة معين. لما كان الهدف من مسألة الأمثلة هو الحصول على أفضل أداء للمنظومة وفق مجموعة من المعايير، لذلك نقوم بدايةً بدراسة مجموعة من المعايير المعتمدة في الأدبيات المتعلقة بدراسة حركة الروبوتات ثنائية الأرجل المعتمدة على مبدأ الحلقة الحدية وتطبيقها على النموذج البسيط مع إجراء مقارنة فيما بينها واعتماد عدد منها في عملية الأمثلة، لنقوم بعد ذلك بتعریف مسألة الأمثلة انطلاقاً من النتائج التي توصلنا إليها.

2-3 معاملات الأداء للروبوتات ثنائية الأرجل

ذكرنا سابقاً أنّ الروبوتات ثنائية الأرجل غير المفعّلة تسير على منحدر بزاوية ميلان معينة بالاعتماد على الديناميک الداخلي بدون استخدام أي مصدر للطاقة، وهنا نطرح السؤال التالي:

ما هي المعايير التي يمكن من خلالها الحكم على أداء الروبوت ثنائي الأرجل غير المفعّل، وعلى أية أساس يمكن تصنيف هذه الروبوتات من حيث الكفاءة؟

عموماً وجدنا أنّ معظم الأدبيات (مثلاً [21,11,14]) تتفق على مجموعة من المعايير يمكن تصنيفها كالتالي:

1. الاستقرار stability: تعبّر عن قدرة الروبوت على التغلب على المؤثرات الخارجية التي قد يصادفها أثناء حركته وبعدد الخطوات التي يقوم بها حتى زوال أثر هذا المؤثّر. يمكن أن

يكون المؤثر الخارجي بشكل اضطراب نبضي كتغير ارتفاع الأرض التي يسير عليها الروبوت لخطوة واحدة فقط أو تعرّضه لقوة تطبق عند الخصر أو الركبة مثلاً. نوصّف استقرار الروبوت في الحالة الأولى بمقدار الاختلاف الأعظمي في استوائية الأرض الممكّن تجاوزه بنجاح، وفي الثانية بمقدار القوّة الأعظمي. إضافة إلى ذلك الاضطراب "النبضي" يمكن أن يكون المؤثّر بشكل اختلافات متكررة في استوائية الأرض التي يتحرك عليها الروبوت.

2. الكفاءة الطاقيّة energy efficiency: وهي تعّبر عن مقدار الطاقة التي يستهلكها الروبوت لتحريك واحدة الكتلة منه مسافة محددة.

3. التنوّع في الحركات versatility: ويقصد به مجال سرعة حركة الروبوت.

فيما يلي نتناول كل من هذه المعايير بالتفصيل.

1-2-3 دراسة الاستقرار

نقصد بالاستقرار في الروبوتات ثنائية الأرجل بمعناه العام "تجّب السقوط" [21]، وفي حالة الروبوتات غير المفعّلة التي تعتبر كنوع خاص من الروبوتات المعتمدة على مبدأ الحلقة الحديّة، فإنّ ضمان حركة الروبوت على حلقته الحديّة limit cycle في فضاء الحالة كافٍ لضمان استقرار الروبوت [21]، حيث درسنا مسقط هذه الحلقة في الفصل الخاص بنمذجة الروبوت (الشكل 2-17). مما سبق نجد أنّه يمكن وبشكل مباشر ربط استقرار الروبوت بإمكانية:

1. تقاربه من الحلقة الحديّة انطلاقاً من مجموعة من الشروط الابتدائية في فضاء الحالة وهذا ما يسمى بالاستقرار العام.

2. عودة الروبوت إلى حلقته الحديّة عند تعرّضه لاضطراب بمطال صغير أثناء حركته على هذه الحلقة وهذا ما ندعوه بالاستقرار المحلي.

نحاول فيما يلي ربط هذه المفاهيم بعلاقات رياضيّة واستخدام الخوارزميات المناسبة لتحديدها مما يسمح فيما بعد بتعريف مسألة الأمثلة. ولذلك نعرّف بدايةً مفهوم تابع الخطوة الذي تطرقنا له بشكل مبسط في الفصل السابق وهو مفهوم مهم في دراسة الحلقة الحديّة للروبوت وضروري لبناء المقادير الموصّفة للاستقرار التي سنتطرّق لها في الفقرات التالية.

1-2-3 تابع الخطوة *stride function*

نعرف تابع الخطوة s بأنه الرابط بين مجموعة الشروط الابتدائية لشعاع الحالة (q, \dot{q}) وبين بداية خطوة والخطوة التي تليها [12]، ونكتب:

$$u_{n+1} = f(u_n) \quad (3.1)$$

في حالة الروبوت البسيط (الفقرة 2-1) يبدأ تابع الخطوة في اللحظة التي تلي مباشرةً صدم الرجل المتقدمة الأرض، ليليها المكاملة الرقمية للمعادلات (13-2) حتى لحظة الصدم في الركبة، بعد ذلك تليها المكاملة الرقمية حتى لحظة صدم القدم المتقدمة للأرض، وفي حالي الصدم نستخدم معادلات الصدم (19-2).

لا تؤدي جميع قيم الشروط الابتدائية إلى حركة مستقرة للروبوت، فحتى يتحقق الاستقرار يجب أن يكون خرج تابع الخطوة بعد تطبيقه عدداً من المرات متقارباً من نقطة واحدة ندعوها بالنقطة الثابتة وهي النقطة التي تتحقق:

$$u^* = f(u^*) \quad (3.2)$$

وندعو نمط الحركة في هذه الحالة بالنمط الدوري من الدرجة الأولى 1-period cyclic motion. إن الانزياح قليلاً عن النقطة الثابتة لا يعني سقوط الروبوت، بل يمكن أن تقارب قيمة خرج هذا التابع بعد تطبيقه عدد من المرات نحو النقطة الثابتة من جديد.

لا تكون الحركة دورية من الدرجة الأولى في جميع الحالات، ويمكن أن تؤدي مجموعة الشروط الابتدائية إلى مجموعة من النقاط يتناوب بينها تابع الخطوة، كما يلي:

$$\begin{aligned} u^2 &= f(u^1) \\ &\vdots \\ u^k &= f(u^{k-1}) \\ u^1 &= f(u^k) \end{aligned} \quad (3.3)$$

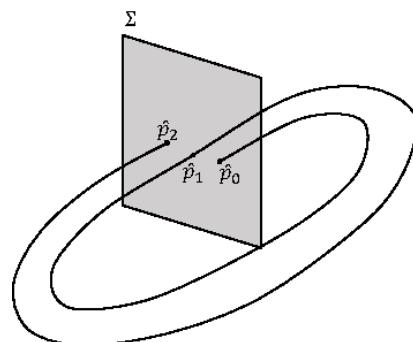
ونقول في هذه الحالة أن حركة الروبوت دورية من الدرجة k .

2-1-2-3 الربط النقطي Point Mapping

ذكرنا في الفقرة السابقة أنه في حال انطلقنا من شعاع الحالة في اللحظة التي تلي الصدم مع الأرض وطبقنا تابع الخطوة على هذا الشعاع وراقبنا الخروج بعد لحظة الصدم التالية، سيعطينا ذلك فكرة عن سلوك النظام وهذا ما يعرف بالربط النقطي أو Poincare map [45]. إذاً مفهوم الربط النقطي يعني مراقبة حالة النظام في لحظات متقطعة من الزمن عوضاً عن مراقبة كامل مسار الحركة، وهو مفهوم مهم في حالة التحكم اللاخطي لأنّه يعطينا معلومات مهمة عن حالة النظام [45].

يمكن إنشاء هذا المفهوم وفق عدّة طرق، ويعتمد ذلك على طبيعة النظام والهدف المطلوب من الدراسة [45]، ففي حالة نظامنا الذي لا يعتمد بشكل واضح على الزمن نعرف المستوى Σ في المنطقة من فضاء الحالة التي تلي مباشرة لحظة صدم القدم الأرض - يتحدد شعاع الحالة في هذه المنطقة بثلاث متحوّلات $[\theta_1, \theta_2]$ في حالة النموذج البسيط - نسمى هذا المستوى بمستوى الربط. ونأخذ نقطة من فضاء الحالة تنتهي إلى Σ ولتكن p_1 (الشكل 3-1) حيث تعتبر أنّ حركتنا تبدأ من هذه النقطة، وبالتالي فإنّ مسار الحركة المولّد باستخدام تابع الخطوة قد يقطع المستوى المعني في الخطوة التالية أو لا يقطعه، ولكن بفرض قطع مسار الحركة هذا المستوى في النقطة p'_1 ، نسمى هذه النقطة بصورة النقطة p_1 . بعد ذلك لنأخذ نقطة ثانية p_2 ولتكن صورتها p'_2 ، فالنتيجة وبعد اختبار كامل نقاط هذا المستوى نحصل على الربط:

$$G: \Sigma \rightarrow \Sigma$$

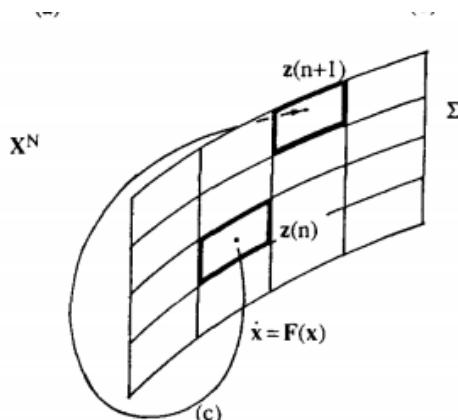


الشكل 3-1: رسم توضيحي لمفهوم الربط النقطي.

وبناءً على تابع الربط يمكن تحديد مجموعة النقاط من المستوى Σ التي تؤدي إلى حركة مستقرة للروبوت. ندعو مجموعة هذه النقاط بمنطقة الجذب (BOA) [20] Basin of attraction (BOA)، ونلاحظ أنّ تحديد هذه النقاط كافٍ لدراسة الاستقرار العام للروبوت.

3-2-3 دراسة الاستقرار العام باستخدام مفهوم BOA

كما ذكرنا سابقاً نقصد بال BOA مجموعة الشروط الابتدائية التي إذا انطلق منها الروبوت يبقى محافظاً على استقراره ولا يسقط. يتم حساب مجموعة هذه النقاط باستخدام خوارزمية Cell Mapping [45]، حيث تقوم هذه الخوارزمية على تقسيم مجال العمل المتوقع في مستوى الربط إلى عدد كبير من الخلايا المجاورة بأحجام ثابتة صغيرة الحجم، فمثلاً يبيّن الشكل 3-2 تقسيم مستوى الربط في فضاء ثلاثي البعد، ويتم تمثيل كل خلية بإحداثيات مركزها. بعد ذلك نمر بالتدريج على هذه النقاط بحيث تصنّف النقطة التي تؤدي إلى حركة مستقرة كنقطة تقارب.



الشكل 3-2: تقسيم مستوى الربط إلى مجموعة خلايا باستخدام خوارزمية Cell Mapping.

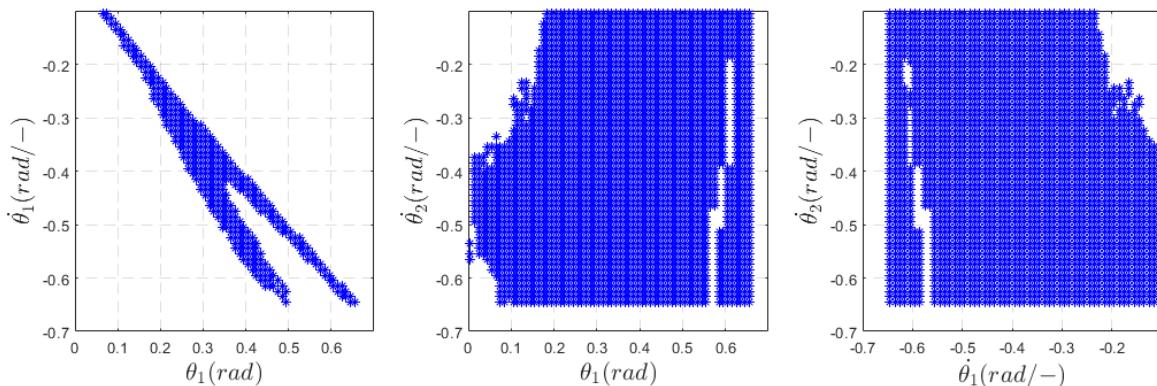
بفرض انطلقنا من الخلية الأولى وبالتطبيق المتالي لتابع الخطوة نحصل على تسلٍ من الخلايا. هذا التسلٍ يمكن أن يقودنا إلى خارج المنطقة المدروسة وبالتالي يتم تصنيف هذا التسلٍ بأنه غير متقارب. بالمقابل يمكن أن يؤدي هذا التسلٍ إلى حركة دورية بدور k وبالتالي يتم تصنيف هذه النقاط على هذا الأساس.

من الواضح أنّ دراسة مجال التقارب تتعلق بشكل كبير بحجم الخلية فكلما كانت الخلية أصغر كانت النتائج أدق، ولكن يزداد زمن الحساب بشكل كبير. بالمقابل تقلل زيادة حجم الخلية من زمن الحساب ولكنها تخّفض من الدقة.

للتغلب على موضوع مشكلة الحساب، اقترح Zang خوارزمية أسمها Cell Mapping [35]، وهنا يتم إنجاز العمل على عدة تكرارات، وفي كل مرّة يتم تقسيم الخلايا التي تمّ تصنيفها كمتقاربة إلى خلايا أصغر في التكرار التالي مع استبعاد الخلايا التي لم يتم تصنيفها كمتقاربة، وهذا الأمر قلل بشكل كبير من زمن الحساب. ننوه إلى أنّه عندما قمنا بتجزئ الخوارزميةأخذنا إضافةً إلى لخلية المتقاربة الخلايا المحيطة بها أيضاً وذلك لزيادة دقة الخوارزمية.

Gradual Point Cell Mapping التطبيق العملي لخوارزمية

يبيّن الشكل 3-3 التطبيق العملي لخوارزمية Gradual Point Cell Mapping، على النموذج البسيط في الفقرة 2-1. تم اختيار مجال المتغيرات بالاستفادة من دراسات سابقة لمجال التقارب [36,37,21] وبناء على بعض التجارب على نموذجنا.



الشكل 3-3: منطقة الجذب لنموذج الروبوت البسيط باستخدام خوارزمية GPCM من أجل ميل منحدر . $\beta = 0.03rad$

3-4-1-2 دراسة الاستقرار المحلي

تحدد حركة الروبوت من بداية خطوة إلى بداية الخطوة التالية بتتابع الخطوة f ، وعند حركة الروبوت على حلقة الحدّية بحركة دورّية بدور مساوي للواحد، يكون:

$$u^* = f(u^*) \quad (3.4)$$

حيث: u^* هي النقطة الثابتة.

يؤدي تعرض الروبوت لاضطراب بمطال صغير على شعاع الحالة أثناء حركته على حلقة الحدية إلى خروج الروبوت عن هذه الحلقة ويغير نتيجة لذلك شعاع الحالة عند نهاية الخطوة بمقدار صغير δu ويمكن أن نكتب باستخدام التقرير الخطبي:

$$\delta u_{n+1} = \frac{\partial f(u^*)}{\partial u} \delta u_n = J \cdot \delta u_n \quad (3.5)$$

حيث: δu_n هو الاضطراب أو الانحراف عن النقطة الثابتة عند بداية الخطوة. δu_{n+1} هو الانحراف عن النقطة الثابتة عند بداية الخطوة التالية. J هي مصفوفة اليعقوبي المرتبطة بتتابع الخطوة.

يمكن أن يبقى الروبوت مستقراً حتى في حال تعرضه لاضطراب خارجي بمطال صغير يؤدي إلى إزاحته عن هذه الحلقة في حال كانت القيم الذاتية لمصفوفة اليعقوبي المرتبطة بتتابع الخطوة ضمن الدائرة الواحدية [46]. حيث تقارب الحركة من المسار الحدي مع تالي الخطوات ويختفي أثر الاضطراب بشكل تدريجي، وكلما كانت القيم الذاتية أقرب للصفر كلّما كان التقارب أسرع، وفي حال كانت القيم الذاتية أكبر من الواحد يتزايد أثر الاضطراب ويؤدي ذلك إلى سقوط الروبوت [46].

إنّ مسألة حساب مصفوفة اليعقوبي باستخدام الطرق التحليلية هي مسألة في غاية الصعوبة وذلك بسبب الطبيعة غير الخطية المتقطعة لتتابع الخطوة، وخصوصاً إذا أخذنا في عين الاعتبار تعقيد التصميم المعتمد للروبوت ودرجات حرائه. يتم عادة اللجوء إلى الطرق الرقمية [21] لحساب مصفوفة اليعقوبي لتتابع الخطوة وذلك بإضافة اضطراب بمطال صغير إلى مركبة وحيدة من مركبات شعاع الحالة عند النقطة الثابتة وحساب التغيير في خرج تابع الخطوة. نكرر ذلك من أجل جميع المركبات ونحصل بالنتيجة على مصفوفة اليعقوبي المطلوبة ونحسب قيمها الذاتية. توضح الخوارزمية التالية طريقة الحساب المعتمدة [35]:

repeat for all element of u

$$u_{0,pert} = u_0$$

$$u_{0,pert}(j) = u_{0,pert}(j) + \delta$$

$$u_1 + \Delta u_{1,pert} = f(u_{0,pert})$$

$$J(:, j) = \Delta u_{1,pert} / \delta$$

where $J(:, j)$ indicates the $j - th$ column of J

حيث نقوم بحساب النقطة الثابتة بدقة 10^{-8} باستخدام المكاملات الرقمية بدقة حساب 10^{-10} ونعرض النقطة الثابتة لاضطراب من رتبة 10^{-5} .

3-2-1-5 دراسة الاستقرار باستخدام مفهوم Gait Sensitivity Norm

قدّم هذا المفهوم من قبل Hobbelen [21]، ويعتمد على قياس تأثير اضطراب ما على مسیر الروبوت، حيث يتم تعريض الروبوت لاضطراب محدد e وبقياس تأثير هذا الاضطراب على خرج محدد g موصّف لحركة الروبوت. يتم قياس الاستجابة الديناميكية بحساب النظيم الثنائي للمقدار $\frac{\partial g}{\partial e}$ وكلما كانت قيمة هذا المقدار أقلّ كان الروبوت أكثر استقراراً. يعود للمصمم اختيار الاضطراب وخرج الروبوت فعلى سبيل المثال من أجل الاضطراب e يتم تعريض الروبوت لقوّة لحظيّة بطيولة محددة مطبّقة عند نقطة الخصر أو إضافة اضطراب محدد لاستوائية الأرض التي يتحرك عليها الروبوت؛ أمّا بالنسبة للخرج المقاس فيجب أن يرتبط بأنماط الفشل للروبوت فمثلاً يؤخذ ارتفاع الرجل المتأرجحة عن الأرض عند تقاطعها مع الرجل المستقرة foot clearance، أو طول خطوة الروبوت أو زمن الخطوة.

استخدم Hobbelen في دراسته انخفاضاً مفاجئاً في الأرض بمقدار معين e كاضطراب للدخل، أمّا بالنسبة للخرج فقد استخدم زمن الخطوة، وأثبتت ارتباط هذا المفهوم بمجال الجذب للروبوت BOA، وقدرته على التنبؤ بفشل الروبوت بشكل كبير.

بغية حساب Gait Sensitivity Norm (GSN) نختار المعاملات التي اختارها Hobbelen لهذا المفهوم وذلك بسبب اهتمامنا بزيادة قدرة الروبوت على تجاوز الاضطرابات في استوائية الأرض التي يتحرك عليها، وهنا نقوم بتوسيع مفهوم تابع الخطوة، ونضيف زمن الخطوة الواحدة كخرج إضافي، ونختار الاضطراب الخطوي سابق الذكر كدخل [35]:

$$S : \begin{cases} u_{n+1} = f_v(u_n, e_n) \\ g_n = f_g(u_n, e_n) \end{cases} \quad (3.6)$$

تكتب هذه التوابع بجوار نقطة العمل بالشكل:

$$S : \begin{cases} u^* = f_v(u^*, 0) \\ g^* = f_g(u^*, 0) \end{cases} \quad (3.7)$$

ويكون التقريب الخطّي بجوار نقطة العمل (النقطة الثابتة) - بفرض تعرّض الروبوت لاضطراب بمطال صغير ϵ وتغيير في شعاع حالة الدخول بمقدار Δu - الشكل 3:

$$\begin{aligned}\Delta u_{n+1} &= A \Delta u_n + B e_n \\ \Delta g_n &= C \Delta u_n + D e_n\end{aligned}\quad (3.8)$$

حيث:

$$A = \frac{\partial f_v(u^*, 0)}{\partial u_n}$$

$B = \frac{\partial f_v(u^*, 0)}{\partial e_n}$: مصفوفة الحساسية التي تعطي تأثير الاضطراب المطبق في الخطوة n على

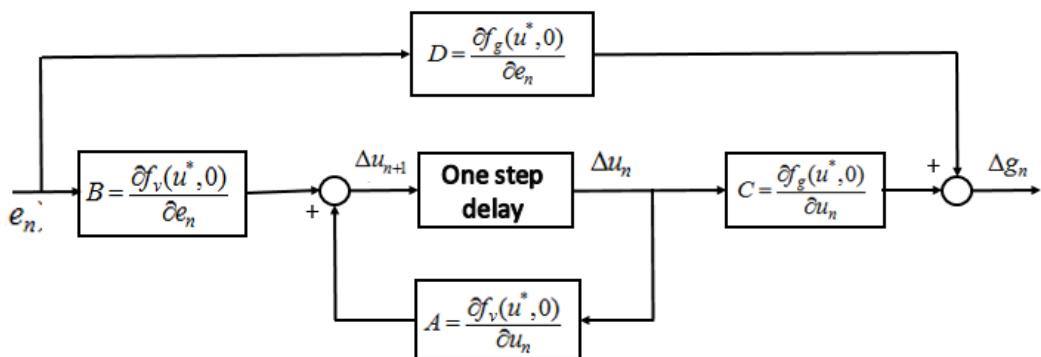
الشروط الابتدائية في بداية الخطوة التالية $.n+1$

$C = \frac{\partial f_g(u^*, 0)}{\partial u_n}$: مصفوفة الحساسية التي تعطي تغيير موصف الحركة Δg_n من أجل الخطوة

التي تبدأ بالشروط الابتدائية $. \Delta u_n$

$D = \frac{\partial f_g(u^*, 0)}{\partial e_n}$: مصفوفة الحساسية التي تعطي تغيير موصف الحركة Δg_n الناتج عن تطبيق

الاضطراب ϵ .



الشكل 3-4: المخطط الصندوقي لتتابع الخطوة في حالته المستقرة، مع دخل بشكل اضطراب وخرج يمثل الانحراف عن النقطة الثابتة والانحراف عن قيمة موصف الحركة المختار عند النقطة الثابتة [35].

يتم تحديد مصفوفات الحساسية السابقة باستخدام الحساب الرقمي عن طريق تحليل الاضطراب لتابع الخطوة بشكل مشابه لحساب مصفوفة اليعقوبي لتابع الخطوة.

يمكن حساب القيمة العددية GSN بعد تحديد المصفوفات السابقة باستخدام العلاقة:

$$\left\| \frac{\partial g}{\partial e} \right\|_2 = \sqrt{trace(D^T D) + \sum_{k=0}^{\infty} trace(B^T (A^T)^k C^T C A^k B)} \quad (3.9)$$

عوضاً عن حساب المصفوفات بشكل رقمي، يمكن قياس تأثير الاضطراب على الخطوات التي تلي تطبيق الاضطراب على الروبوت، وفي هذه الحالة تحسب القيمة GSN بالطريقة التالية:

$$\left\| \frac{\partial g}{\partial e} \right\|_2 = \frac{1}{|e_0|} \sqrt{\sum_{i=1}^q \sum_{k=0}^{\infty} (g_k(i) - g^*(i))^2} \quad (3.10)$$

حيث:

$|e_0|$: طولية الاضطراب المطبق.

(i): خرج المركبة $\dot{1}$ للتتابع الموصّف لحركة الروبوت المختار مع تطبيق الاضطراب.

(i^*): خرج المركبة $\dot{1}$ للتتابع الموصّف لحركة الروبوت المختار بدون تطبيق الاضطراب (في حالة الحركة على المسار الموصّف بالحلقة الحديّة). التابع g في حالتنا هو تابع بمركبة وحيدة تمثل زمن خطوة الروبوت.

3-2-6 مقارنة معايير الاستقرار المختلفة

نحاول في هذه الفقرة دراسة معاملات الاستقرار المشروحة سابقاً بغية المقارنة فيما بينها، و اختيار المعاملات التي سنعتمدها في أمثلة التصميم الميكانيكي لنموذج الروبوت المعتمد.

كتطبيق عملي نقوم بإيجاد القيمة الأمثلية لميلان الأرض التي يتحرك عليها الروبوت البسيط والتي تعطي الاستقرار الأعظمي وفق كل معيار من المعايير المشروحة سابقاً حيث يعبر انحدار الأرض عن كمية الطاقة المقدمة للروبوت أثناء الحركة، ولذلك فدراسة الاستقرار بدلالة هذا المقدار مهمة من أجل عمليات التحكم وتعويض أثر الجاذبية الأرضية عند الانتقال من حالة الروبوتات غير المفعّلة إلى حالة الروبوتات المفعّلة.

بالنسبة لتابع معيار حساسية الخطوة GSN نأخذ كاضطراب للدخل في هذه الحالة التغيير في ارتفاع الأرض التي يتحرك عليها الروبوت، بينما نحدد الخرج الموصف للحركة بالزمن الذي تأخذه الخطوة. نحسب المقدار λ_{\max} كما وضّحنا سابقاً في صياغة المسألة ونقارن بين القيم باستخدام طريقتي الحساب اللتين قدمهما Hobbelen (المعادلات (3.9) و (3.10)) حيث نسمي القيمة المحسوبة باستخدام المعادلة الأولى بـ realGSN بينما نسمي الثانية calcGSN .

نحسب إضافةً إلى ما سبق مصفوفة اليعقوبي المرتبطة بتابع الخطوة، والقيمة الذاتية العظمى لهذه المصفوفة $|\lambda_{\max}|$ ، فكما ذكرنا سابقاً إن شرط الاستقرار على الحلقة الحدية أن تكون القيم الذاتية ضمن الدائرة الواحدية وكلما كانت القيمة العظمى أقرب إلى الصفر كلما كان الاستقرار على الحلقة الحدية أفضل.

كما نحسب الاضطراب الأعظمي - الممثل بانخفاض مفاجئ في ارتفاع الأرض التي يتحرك عليها الروبوت لخطوة واحدة - الذي يمكن للروبوت تجاوزه.

بهدف جعل نتائج الدراسة أكثر وضوحاً ولتسهيل المقارنة بين المعايير المختلفة، نقوم بحصر جميع القيم ضمن قيم واحدية ويتم ذلك بتقسيم معياري GSN ومعيار الاضطراب الأعظمي على قيمتيهما العظمتين، كما نأخذ مقلوب معيار GSN حيث يزداد الاستقرار مع زيادة هذا المقلوب. كما نأخذ فرق القيمة الذاتية العظمى لمصفوفة اليعقوبي عن القيمة الواحدية، حتى يزداد الاستقرار مع زيادة هذه القيمة.

بالتالي نحصل على الشكل 3-5، ويظهر فيه استقرار الروبوت حتى زاوية ميلان بقيمة 0.055rad بعد ذلك تندلع الحلقة الحدية بدور وحيد، وتظهر حلقة حدية بعدة أدوار k-period limit cycle، ولكننا نستبعدها من دراستنا كوننا نركّز الاهتمام على الحلقات بدور وحيد فقط.

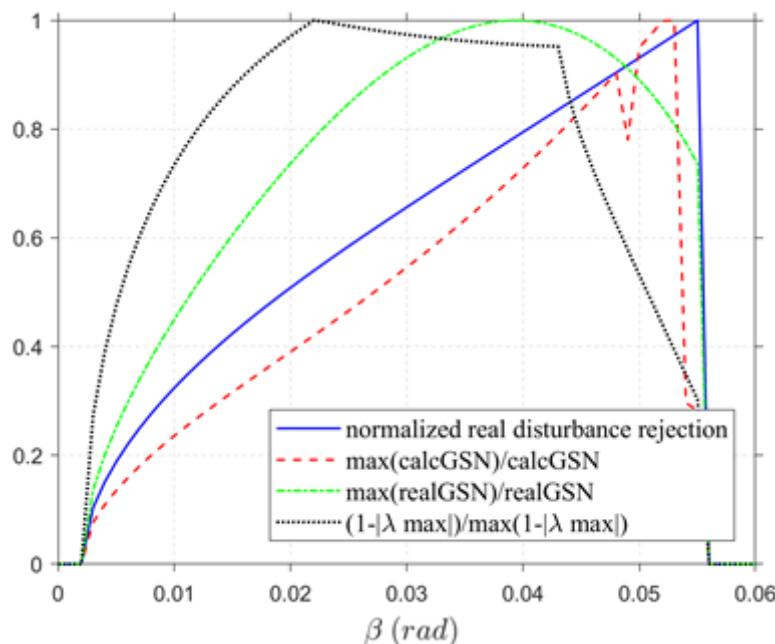
يبين الجدول 3-1 مقدار الارتباط بين المعايير المختلفة و زمن الحساب الوسطي لكل منها منسوباً إلى زمن حساب العائق الأعظمي، ونقصد بزمن الحساب الزمن اللازم للحصول على المقدار المطلوب عن طريق النمذجة الحاسوبية. يعود سبب اهتمامنا بزمن الحساب إلى أن خوارزميات الأمثلة المعتمدة (كما سنرى فيما بعد) هي خوارزميات تكرارية تقوم على تكرار تطبيق توابع كلفة محددة

لعدد كبير من المرات ولذلك يلعب زمن حساب زمن تابع الكلفة دوراً كبيراً في إمكانية تطبيق هذه الخوارزميات و الزمن تنفيذها.

كما نحسب منطقة الجذب العظمى BOA عند ثلاثة قيم مختلفة للميلان، Gradual Point Cell Mapping $\beta = \{0.01, 0.03, 0.05\} rad$ باستخدام خوارزمية BOA ونلاحظ أن حجم منطقة الجذب يزداد مع نقصان الانحدار (الشكل 3-6).

الجدول 3-1: مقارنة معايير الأداء المرتبطة بالاستقرار للروبوتات ثنائية الأرجل.

Measures	Correlation to				Relative calculation time
	actual disturbance rejection	calcGSN	realGSN	$1 - \max \lambda_{\max} $	
actual disturbance rejection	--	87%	81.3%	9.6%	1
calcGSN	--	--	85.1%	0%	0.16
realGSN	--	--	--	50%	0.94
$1 - \max \lambda_{\max} $	--	--	--	--	0.12

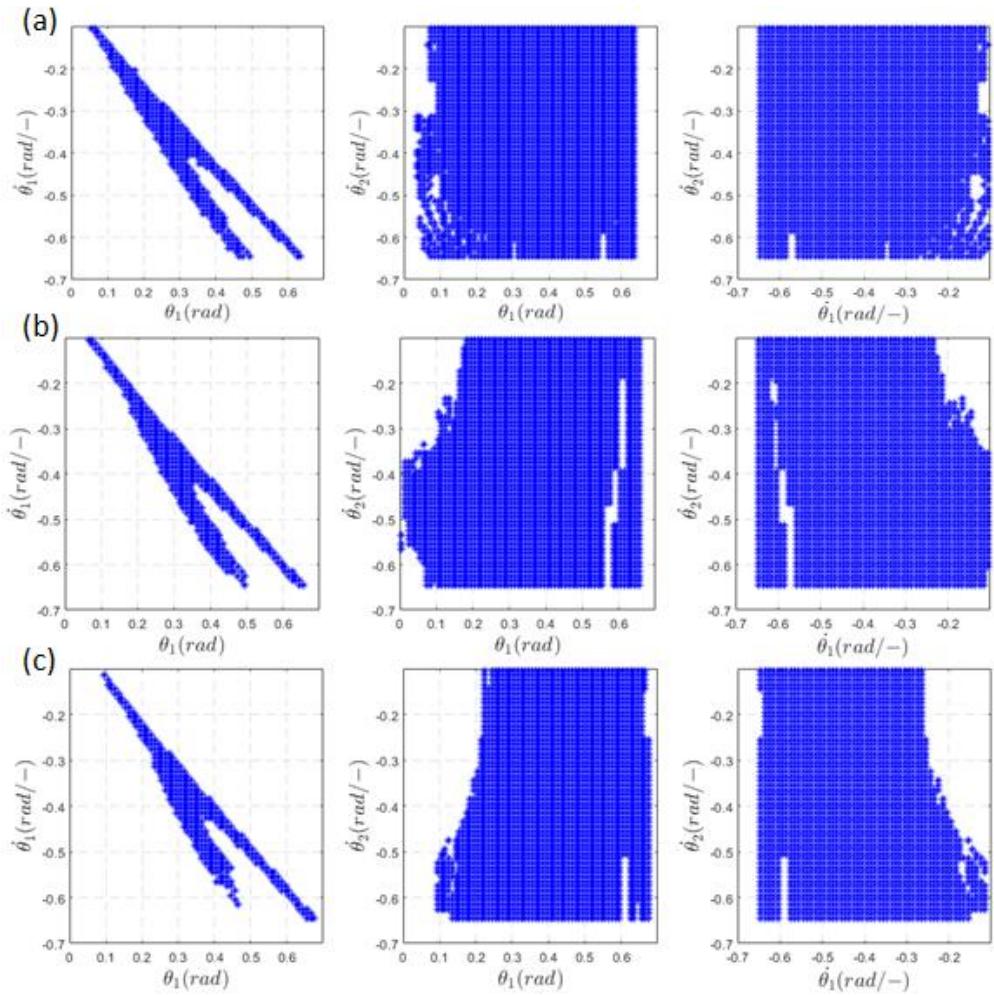


الشكل 3-5: مقارنة معايير الاستقرار الموصقة للروبوتات ثنائية الأرجل مع تغيير زاوية المنحدر.

مما سبق نستنتج:

- (a) زمن حساب القيمة الحقيقية للعائق الأعظمي كبير مقارنةً مع طرق الحساب الأخرى.
- (b) يتفوق المعيار calcGSN على المعيار realGSN من ناحية الارتباط بالقيمة الحقيقة للعائق الأعظمي الممكن تجاوزه كما يتفوق عليه في زمن الحساب.
- (c) ارتباط المعيار $|\lambda_{\max}| - 1$ بالمعايير الثلاثة الأخرى منخفض نوعاً ما.
- (d) حجم منطقة الجذب BOA لا يرتبط بقدرة الروبوت على تجاوز العوائق المتمثلة بتغيير في استوائية الأرض التي يتحرك عليها الروبوت أثناء حركته.
- (e) على الرغم من الارتباط بين معيار realGSN والقيمة الحقيقية للعائق الأعظمي، وتفوقها عليه من ناحية زمن الحساب، ولكن نرى أن إيجاد القيمة الحقيقية للعائق الأعظمي أفضل لوصف قدرة الروبوت على تجاوز هذا النوع من الاضطراب، وخصوصاً أن زمن الحساب لا يمنع استخدام هذا المعيار في خوارزميات الأمثلة التي سنعتمدها فيما بعد.

بناءً على ما سبق نجد أن اختيار طويلة القيم الذاتية لمصفوفة اليعقوبي كمعيار لدراسة الاستقرار المحلي، واختيار قيمة العائق الأعظمي الممكن تجاوزه كمعيار لدراسة قدرة الروبوت على تجاوز العوائق، إضافةً إلى دراسة منطقة الجذب كمعيار للاستقرار العام يوصّف حالة استقرار الروبوت بشكل كامل، وهذه المعايير الثلاثة التي سنعتمدها في دراستنا اللاحقة.



الشكل 3-6: منطقة الجذب لنموذج الروبوت البسيط من أجل زوايا ميلان مختلفة لمنحدر الحركة.

. $\beta = 0.05 \text{ rad}$ (c . $\beta = 0.03 \text{ rad}$ (b . $\beta = 0.01 \text{ rad}$ (f

3-2-3 دراسة الكفاءة الطاقية

تقاس الكفاءة الطاقية بكمية الطاقة المستهلكة من قبل الأنظمة لأداء المهمة المطلوبة، وفي حالة الروبوتات ثنائية الأرجل تقادس الكفاءة الطاقية بالطاقة المستهلكة من قبل الروبوت للانتقال مسافة محددة. بغية المقارنة بين أداء الروبوتات المختلفة يتم تقسيم هذه القيمة على وزن الروبوت مضروباً بالمسافة المقطوعة [25] :

$$C_t = \frac{\text{Used energy}}{\text{weight} \cdot \text{distance travelled}} \quad (3.11)$$

تعتمد الروبوتات غير المفعّلة في حركتها على قوة الجاذبية الأرضية لذلك فالطاقة المستهلكة تساوي عمل قوة الجاذبية، ولما كانت الجاذبية قوة محافظة، تصبح بالتالي الطاقة المستهلكة متساوية لجib زاوية ميلان الأرض التي يتحرك عليها الروبوت.

3-2-3 التنوع في الحركات

توصف سرعة حركة الروبوتات ثنائية الأرجل باستخدام رقم فرود [43] Froude Number، والمعرف بالعلاقة:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot l}} \quad (3.12)$$

حيث: v : سرعة حركة الروبوت، l : طول رجل الروبوت، g : تسارع الجاذبية الأرضية.

تحريك الروبوتات غير المفعّلة بسرعة ثابتة من أجل دخل طaci ثابت ممثل بميل المنحدر الذي يتحرك عليه الروبوت، ولذلك يعتبر انعدام التنوع في الحركات أحد مشاكل هذه الروبوتات التي نسعى للعمل على إيجاد حل لها في الدراسة التحكمية في الفصل التالي، ونكتفي في هذا الفصل بدراسة المعاملات التصميمية التي تعطي أكبر سرعة حركة ممكنة.

3-3 دراسة أمثلة التصميم الميكانيكي للروبوتات ثنائية الأرجل غير المفعّلة

نسعي خلال الفقرات التالية إلى بناء إجرائية تهدف إلى اختيار معاملات التصميم الأمثلية للحصول على أفضل أداء ديناميكي ممكن للروبوت غير المفعّل بسبعة أجسام المنمنج في الفقرة 2-2 بالاعتماد على معايير الأداء المختلفة المدروسة في الفقرات السابقة.

لما كان الهدف الوصول إلى أفضل أداء من ناحية معيار معين أو عدة معايير بتغيير مجموعة من المعاملات التصميمية لذلك ستتعامل مع المسألة بصفتها مسألة أمثلة بتابع كلفة أو بعده توابع كلفة. فنقدم بدايةً دراسة مرجعية لأهم الدراسات التي تمت في هذا المجال، ومن ثم نعرف بموضوع الأمثلة الرياضية، لنتقل بعد ذلك إلى صياغة مسألة الأمثلة في حالتنا والتي تتضمن تحديد المعاملات التصميمية التي نهدف إلى إيجاد القيم الأمثلية لها والقيود المفروضة على تغييراتها. بعد تعريف وتحديد مسألة الأمثلة ننتقل لتحديد معاملات التصميم الميكانيكي التي تعطي الأداء الأفضل من ناحية

الاستقرار المحلي، والصلادة ضد التغييرات في استوائية الأرض التي يتحرك عليها الروبوت، ومن ثم من ناحية سرعة الحركة بصياغة توابع الكلفة المناسبة في كل حالة.

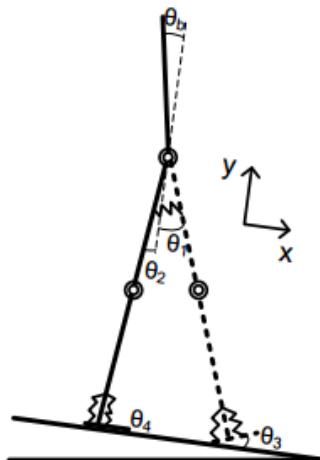
3-1-3 دراسة مرجعية

تناولت العديد من الأبحاث تأثير معاملات التصميم المختلفة على أداء الروبوتات ثنائية الأرجل، فمثلاً قام McGeer بدراسة أثر نصف قطر القدم وموضع مركز ثقل الرجل للروبوت على الاستقرار باستخدام ضوارب Floquent [12]، وتوصلت لنتيجة أن القدم المقوسة تعطي نتائج أفضل للاستقرار من القدم النقطية، وكذلك أعطى Wang معاملات القدم المسطحة الأمثلية باستخدام ضوارب Floquent أيضاً [47]، كما قام Wisse بدراسة الاستقرار باستخدام مفهوم Gait Sensitivity Norm وتوصل إلى أن القدم المسطحة المتصلة مع الروبوت باستخدام نوابض غير مفعّلة تعطي استقراراً أكبر من حالة القدم المقوسة [48]، وقد توصل Manoonpong لنفس النتيجة [17]. درس Hass باستخدام خوارزمية الأمثلية NPOSA تأثير توزيع الكتل على استقرار وسرعة حركة نموذج روبوتi بسيط [34]، وأجرى Huang دراسة بهدف أمثلة توزيع الكتل لروبوت ثقلي الأرجل بخمسة أجسام باستخدام خوارزمية عناصر السرب الأمثلية وتوصل إلى توزيع الكتل الذي يعطي الأداء الأمثل من ناحية الاستقرار والسرعة والصرف الطائي [46]. قام Zang بعملية تطوير لروبوت غير مفعّل بالاعتماد على أمثلة معاملات التصميم الميكانيكي لروبوت بأربع درجات حرية يقدم مقوسة مستخدماً مفهوم BOA وخوارزمية Gradual Point Cell Mapping [37]، وأعاد الدراسة من أجل روبوت بست درجات حرية (الشكل 3-7). عملية الأمثلية شملت العناصر المبينة في الجدول 3-2، وتوصل إلى النسب الأفضل التي تعطي الاستقرار الشامل الأعظمي [20]، كما درس تأثير معاملات التصميم لنموذج بسيط يقدم مقوسة معأخذ مرنة الأرض التي يتحرك عليها الروبوت بعين الاعتبار [52]، وتم إثبات أن ثوابت صلابة النوابض المستخدمة في مفصل الكاحل تلعب دوراً كبيراً في الاستقرار مع إيجاد القيم الأمثلية التي تعطي الأداء الأفضل لروبوت بسيط غير فعال مكون من رجلين بدون ركب يتحرك في الوسط ثلاثي البعد [53]. ونهايةً درس Wu التصميم الأمثل لميكانيكي لروبوت غير فعال بسيط يقدم مقوسة معأخذ التأثير المتبادل لمعاملات التصميم الميكانيكي مع بعضها البعض باستخدام خوارزمية عناصر السرب الأمثلية وباعتماد عدة توابع كلفة مرتبطة بمعاملات أداء مختلفة [54]. ركّزت معظم الدراسات السابقة على موضوع دراسة كل

معامل من المعاملات على حدة دون التطرق لمسألة التأثير المشترك بين هذه المعاملات باستثناء دراسات Wu ولكن هذه الدراسة تمت على نموذج بسيط لروبوت بدرجتي حرية فقط وبقدم مقوسة [54].

الجدول 3-2: المعاملات المستخدمة في أمثلة التصميم الميكانيكي لروبوت بسبعة أجسام من قبل Zang [20]

Parameter	Description	Parameter	Description
m_b	Body mass	c_t	Thigh COM
m_h	Hip mass	c_s	Shank COM
m_t	Thigh mass	l_t	Thigh length
m_s	Shank mass	r	Foot length
c_b	Body COM		



الشكل 3-7: نموذج الروبوت المعتمد في عملية الأمثلة من قبل Zang [20]

3-3-2 تعريف بالأمثلة الرياضية

نعرف مسألة الأمثلة رياضيًّا بالشكل التالي:

find a vector $P^* = [p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*]$
that minimize $F(P)$
with $g_m(P) < 0$ (m inequality constraints)
and $h_l(P) = 0$ (l equality constraints)

حيث يمثل P شعاع المعاملات التصميمية و F تابع الكلفة المراد أمثلته، ويعبّر كل من $g_m(P) \& h_t(P)$ عن مجموعة قيود المساواة وقيود المتراجحة المفروضة على المعاملات التصميمية للروبوت.

إذاً يلزم لبناء مسألة الأمثلة تحديد المعاملات التصميمية والقيود المفروضة عليها، إضافةً إلى تحديد توابع الكلفة المرتبطة بالمعاملات المراد أمثلتها، وتحديد إجرائية الأمثلة المناسبة.

3-3-3 معاملات وقيود التصميم

يبين الجدول 3-3 مجموعة المعاملات غير البعدية الموصفة للنموذج بسبعة أجسام المعتمد في حالتنا. نلاحظ أنّ بعض هذه المعاملات مرتبطة بعضه البعض بقيود، نوضح هذه القيود مع عدد المتحولات الأصغرى لصياغة المسألة كالتالي:

1. بعد مركز عطالة الفخذ عن مفصل الجنع يجب أن يكون أقل من طول الفخذ، وبالتالي نحدد المعاملات المرتبطة بفخذ الروبوت بالشكل التالي:

$$\begin{aligned} l_t &= p_1 \\ a_t &= p_2 l_t \\ m_t &= p_3 \end{aligned}$$

حيث سنشير بالرمز p_i إلى المعاملات التصميمية المراد إيجاد قيم أمثلية لها.

2. طول الساق مساوية لطول الرجل الكلية ناقصاً طول الفخذ، وبناء عليه تكون المعاملات المرتبطة بساق الروبوت كالتالي:

$$\begin{aligned} l_s &= 1 - l_t \\ a_s &= p_4 l_s \\ m_s &= p_5 \end{aligned}$$

3. ترتبط قدم الروبوت مع الساق في نقطة معينة على بعد محدد من كعب القدم، نسبة بعد مفصل الكاحل عن الكعب يلعب دوراً مهمّاً في أداء الروبوت [49]، ولكن كتلة القدم صغيرة وتأثير انزياح مركز عطالتها على الأداء صغير، ولذلك نعتبر أنّ مركز العطالة ثابت وهو في مركز القدم. بناءً عليه تكون المعاملات المرتبطة بالساق وذات التأثير كالتالي:

$$\begin{aligned}l_f &= p_6 \\a_f &= l_f / 2 \\l_{ft} &= p_7 \cdot l_f \\m_f &= p_8\end{aligned}$$

4. نعتبر في دراستنا أن كتلة الجسم العلوي ثابتة وهي تساوي 50% من كتلة الروبوت الكلية، ولكن نعتبر أن مركز عطالتها هي معامل يطلب إيجاد القيمة الأمثلية له وبالتالي تكون المعاملات التصميمية المرتبطة بالجسم العلوي كالتالي:

$$a_b = p_9$$

5. كتلة الجذع تساوي الكتلة الكلية للروبوت ناقصاً منها كتل الساقين والفخذين والقدمين وكتلة الجسم العلوي، وهذه القيمة يجب أن تكون موجبة أو متساوية للصفر.

$$m_h = 1 - 2 \times (m_t + m_s + m_f) - m_b \geq 0$$

6. وجدنا بناءً على بعض التجارب المبدئية أن لعزم العطالة تأثيراً محدوداً ضمن مجال محدد إضافياً إلى صعوبة تحديد قيم هذه العزوم تصميمياً [20]، وبالتالي سنعتبر أن عزوم العطالة ثابتة، وتأخذ قيماً مشابهة لدراسات سابقة في هذا المجال [24,25]:

$$\begin{aligned}I_b &= 0.0231 \\I_t &= 0.0021 \\I_s &= 0.0021 \\I_f &= 0.00025\end{aligned}$$

7. ثابت صلابة النواص في مفاصل الحركة المختلفة معاملات يطلب تحديد القيمة الأمثلية لها أيضاً:

$$\begin{aligned}K_{fa} &= p_{10} \\K_{fb} &= p_{11} \\K_h &= p_{12}\end{aligned}$$

4-3-3 تحديد مجال معاملات التصميم

نحدد مجالات معاملات مسألة الأمثلة بالاستفادة من القيود السابقة وبالاستفادة من دراسات مرئية سابقة للأبعاد التي لا تخضع لهذه القيود [44, 20, 50] إضافةً إلى مقاربة منطقية لبعض القيم، كما يبيّن الجدول 3-3.

بناءً على ما سبق نجد أن حل مسألة الأمثلة المعروفة يتطلب إيجاد القيمة الأمثلية لإثنين عشر معملاً.

جدول 3-3: المجالات المعتمدة لمعاملات التصميم الميكانيكي.

Parameter	Value [-]
p_1	0.4 ~ 0.6
p_2	0.3 ~ 0.8
p_3	0.015 ~ 0.05
p_4	0.3 ~ 0.8
p_5	0.015 ~ 0.05
p_6	0.15 ~ 0.3
p_7	0.5 ~ 0.8
p_8	0.005 ~ 0.015
p_9	0.1 ~ 0.5
p_{10}	0.0 ~ 0.2
p_{11}	0.05 ~ 0.5
p_{12}	0.0 ~ 0.1

5-3-3 تحديد إجرائية الأمثلة وتوابع الكلفة المناسبة

تطرقنا سابقاً لمعايير تحديد الاستقرار للروبوت، واعتمدنا ثلاثة معايير أولها تحديد القيمة الذاتية العظمى للمكافئ الخطى لتابع الخطوة وهذه القيمة تساعد في دراسة الاستقرار المحلي للروبوت، وكذلك تحدثنا عن منطقة الجذب BOA إضافةً إلى إيجاد القيمة الحقيقية للعائق الممكن تجاوزه بشكل مباشر. نلاحظ أن معيار BOA غير مناسب للتطبيق كتابع للكلفة لأن قياس حجم هذه المنطقة بشكل دقيق غير ممكن نظراً لاعتماد حساب هذه المنطقة على خوارزمية Mapping Point Cell Mapping Cell والتي تتطلب وقتاً كبيراً للتنفيذ وحتى مع استخدام خوارزمية Gradual يبقى استخدام تابع كلفة مرتبط بمنطقة الجذب يعني إما من زمن حساب كبير في حال زيادة دقة التقسيم لمجال العمل أو من انخفاض الدقة في حالة تقليل عدد التقسيمات، كما أنه يمكن

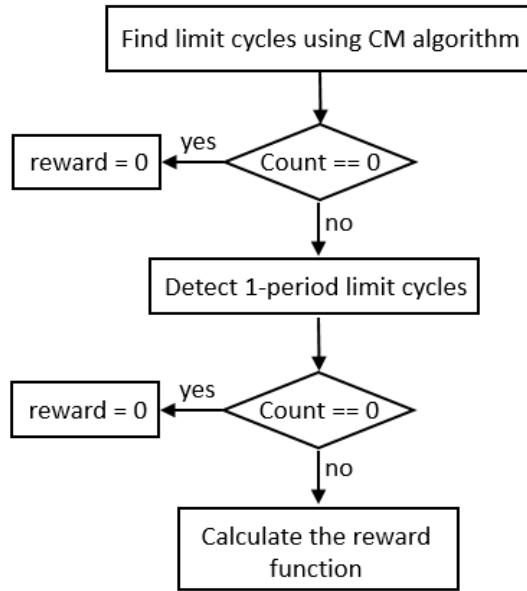
العمل على إيصال الروبوت إلى حلقة الحدّيّة تحكمياً في حال تم بناء نموذج روبوتي حقيقي مستقبلاً. بناءً على ما سبق نذكر في دراستنا للاستقرار على معيارين فقط وهم القيمة الذاتية العظمى لمصفوفة اليعقوبى لتابع الخطوة والقيمة الحقيقية للعائق الممكن تجاوزه، مع الإشارة إلى أنه يمكن توسيع هذه الدراسة لتشمل معاملات استقرار أخرى، فمثلاً تناولت العديد من الدراسات [29,27] تحديد قدرة الروبوت على مقاومة قوة مطبقة بشكل لحظي أو مستمر إما في منطقة الخصر أو منطقة الركبة.

أما بالنسبة للتنوع في الحركات، ذكرنا سابقاً أنَّ هذا المعيار غير ممكِن من أجل الروبوتات غير المفعّلة، وبالتالي نكتفي بدراسة سرعة حركة الروبوت على منحدر مائل بزاوية ثابتة وبالتالي بدخل طaci ثابت وذلك بهدف عزل تأثير الطاقة المدخلة على سرعة الحركة، وإيجاد المعاملات التي تعطي الأداء الأفضل من ناحية سرعة الحركة.

بدايةً، يتطلُّب استخدام المعايير السابقة تحديد النقطة الثابتة للحركة الدورّية للروبوت، مسألة حساب النقطة الثابتة. يمكن حلَّ باستخدام خوارزمية Cell Mapping ولكننا هنا لا نحتاج إلى دقة كبيرة في التقسيمات حيث يكفينا تقارب خلية واحدة ضمن المجال المختار من الخلية التي تحتوي النقطة الثابتة، لنقوم بعد ذلك بتحديد النقطة الثابتة بشكل دقيق ضمن هذه الخلية بالتطبيق المتالي لتابع الخطوة.

بعد تحديد النقطة الثابتة يصبح بالإمكان حساب أي مقدار من مقادير الاستقرار أو المقدار الموصّف لسرعة الحركة أو الأداء الطaci، وتستعمل هذه القيمة في حساب تابع الكلفة المراد إيجاد قيمته العظمى.

يبيّن الشكل 3-8 خطوات تطبيق تابع الكلفة من أجل مسألة الأمثلة بتابع كلفة وحيد مرتبط بالاستقرار.



الشكل 3-8: خطوات إيجاد قيمةتابع الكلفة من أجل خوارزمية الأمثلة المستخدمة في إيجاد معاملات النموذج الروبوتي.

3-3-6 اختيار خوارزمية الأمثلة

لما كانت مسألة الأمثلة المطروحة في حالتنا هي مسألة غير خطية ومتقطعة مع الزمن، إذاً فالحل الأفضل لها يكون باستخدام خوارزمية هجينية وذلك بالدمج بين خوارزمية عشوائية وأخرى حتمية [55]، حيث تقترب الخوارزمية العشوائية من الحل الأمثل العمومي لتابع الخوارزمية الحتمية عملية الأمثلة للوصول إلى هذا الحل بشكل دقيق، نختار خوارزمية عناصر السرب كخوارزمية عشوائية، وخوارزمية البحث بالأنمط العمومية GPS كخوارزمية حتمية.

تعرف خوارزمية عناصر السرب بأنّها تقنية إحصائية تكرارية لا تعتمد على حساب المشتق وتستخدم قيم عشوائية لتجنب التقارب من الحلول الأمثلية المحلية. طرحت الخوارزمية لأول مرة في [51]، حيث تقوم فكرة الخوارزمية على وجود سرب من العناصر ينتشر في منطقة بحث محدودة ويتحرك فيها عشوائياً للبحث عن الحل الأمثل في هذه المنطقة. تبدأ الخوارزمية عملها بتوليد مجموعة من العناصر ضمن فضاء العمل \mathcal{X} مع إسناد قيم سرعة ابتدائية لهذه العناصر وحساب تابع الكلفة لكل منها. تقوم الخوارزمية بتعديل مواضع العناصر وسرعتها مع التكرارات المتلاحقة بالاعتماد على قيمة تابع الكلفة الأفضل ل المجاورات هذه العناصر من التكرار السابق، والقيمة الأفضل لهذه العناصر خلال

جميع التكرارات. فيعطي الموضع الجديد للعناصر بالموقع السابق مضافاً إليه السرعة الحالية والتي تحسب من المعادلة التالية:

$$v_p^{k+1} = w v_p^k + c_1 r_{1p}^k (pbest_p^k - x_p^k) + c_2 r_{2p}^k (gbest_p^k - x_p^k) \quad (3.13)$$

حيث c_1, c_2 معاملات التسارع، و r_{1p}^k, r_{2p}^k أرقام عشوائية خاصة بكل عنصر ضمن المجال $[0,1]$ ، $pbest_p^k$ القيمة الأفضل للعنصر p خلال التكرارات السابقة، $gbest_p^k$ القيمة الأمثلية الأفضل لمجموعة عناصر S يتم اختيارها بشكل عشوائي من N المجاور للعنصر p. يتم تعديل قيمة المعامل w لتجنب التقارب من حل محلي وفق المعادلة:

$$w^{k+1} = \begin{cases} 2w^k & \text{if } nb_{success} > S_c \\ 0.5w^k & \text{if } nb_{failure} > f_c \\ w^k & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.14)$$

يتم ضبط المعاملات S_c, f_c للحصول على الأداء الأفضل، ونقصد بالنجاح (الفشل) الوصول إلى قيمة أفضل (أسوأ) لتتابع الكلفة خلال هذا التكرار من قيم التكرارات السابقة. كما يتم تعديل عدد العناصر المجاورة للعنصر p وفق المعادلة:

$$N = \begin{cases} \min \text{NeighborhoodSize} & \text{if } nb_{success} > S_c \\ \min \left(N + \min \text{NeighborhoodSize} \right) & \text{if } nb_{failure} > f_c \\ \text{SwarmSize} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.15)$$

حيث: SwarmSize عدد عناصر السرب.

العدد الأصغر للمجاورات المأخوذة لكل عنصر من عناصر السرب $\min \text{NeighborhoodSize}$ وتساوي $\text{SwarmSize} \times \min \text{NeighborsFraction}$. يتم ضبط هذه المعاملات تجريبياً للحصول على الأداء الأفضل.

أيما بالنسبة لخوارزمية البحث بالأنمط العمومية (GPS) [55] فهي أحد طائق البحث المباشر Direct Search وهي خوارزمية تكرارية لحل مسائل الأمثلية لا تتطلب معلومات عن التدرج gradient وإنما تعتمد فقط على المقارنة بين قيم تابع الكلفة دون الحاجة لمعرفة قيم مشتقاته. تنطلق الخوارزمية من نقطة بدائية تعتبر تقديرًا مبدئياً للحل

وتحسب سلسلة من النقاط بعملية تكرارية تسعى من خلالها نحو النقطة المثلية. حيث تقوم الخوارزمية في كل تكرار بالبحث ضمن مجموعة من النقاط تسمى الشبكة mesh حول النقطة الحالية، وذلك لإيجاد النقطة التالية التي تكون قيمة تابع الكلفة عندها أقل من قيمته الحالية. تتشكل شبكة البحث من خلال إضافة النقطة الحالية إلى مجموعة من الأشعة المقيسة تسمى النمط pattern. إذا وجدت الخوارزمية نقطة ضمن شبكة البحث تحسن من قيمة تابع الكلفة المدروس عندها تصبح هذه النقطة هي النقطة الجديدة ضمن الخطوة التالية للخوارزمية ويتم زيادة حجم الشبكة المعتمدة حول النقطة الجديدة وهذه العملية تسمى عملية إنقاء poll، وفي حال لم تنجح الخوارزمية في إيجاد نقطة أفضل من النقطة الحالية في مجموعة النقاط المجاورة المعتبرة يتم إنقاص حجم الشبكة والبحث في مجموعة النقاط الجديدة وتسمى هذه العملية عملية البحث search. تتوقف الخوارزمية عندما يصبح حجم الشبكة أقل من حد معين محدد مسبقاً أو عندما يصبح عدد التكرارات أكبر من الحد الأقصى المفروض.

3-4 التطبيق العملي لـ إجرائية الأمثلة المعتمدة

نعرض فيما يلي نتائج إجرائية الأمثلة المتبعة.

1-4-3 أمثلة معاملات الاستقرار والسرعة بتابع كلفة لكل معامل أداء من أجل

دخل طaci ثابت

نقوم بتطبيق خوارزمية الأمثلة على معاملات الأداء من أجل دخل طaci ثابت للروبوت وذلك بهدف عزل تأثير الطاقة عن معاملات الأداء المرتبطة بالاستقرار والسرعة، ويتحقق ذلك بجعل ميل المنحدر الذي يتحرك عليه الروبوت ثابتاً، ونبحث عن معاملات التصميم التي تعطي الأداء الأمثل لناحية معاملات الأداء. نتعامل مع المسألة باعتبارها مسألة أمثلة بتابع كلفة وحيد مرتبط بأحد معاملات الأداء.

نقوم بصياغة تابع كلفة في بيئة Matlab، ومن ثم باستخدام خوارزمية عناصر السرب وفق المعاملات المبينة في الجدول 3-4 نبحث عن الحل الأمثل لكل تابع كلفة على حدة، ونعيد تطبيق الخوارزمية أكثر من مرة لزيادة احتمالية الوصول إلى الحل الأمثل الشامل.

1-1-4-3 الاستقرار المحلي

كما ذكرنا سابقاً، يتعلّق الاستقرار المحلي بالقيمة الذاتية العظمى لمصفوفة العقوبي الخاصة بتابع الخطوة، لذلك نعرف تابع الأداء في هذه الحالة بالشكل:

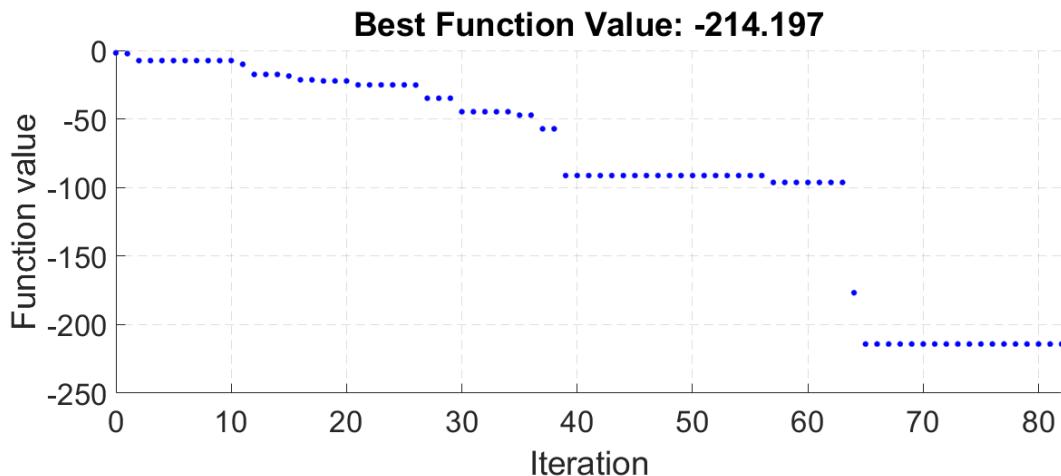
$$\cos tFunction = \frac{1}{1 + \lambda_m} \quad (3.16)$$

الجدول 3-4: معاملات خوارزمية عناصر السرب المستخدمة في عملية الأمثلة.

Parameter	Value
W	0.1
c1	1.49
c2	1.49
Min Neighbors Fraction	0.25
Crossover type	Stochastic
Encoding type	Real
Selection Strategy	Stochastic
Swarm Size	200

يعرض الجدول 3-5 النتائج التي حصلنا عليها من أجل تابع الكلفة المتعلق بالاستقرار المحلي، ويحتوي الجدول أيضاً على قيم معاملات الأداء من أجل هذه النتائج، ويبين الشكل 3-9 تقارب الخوارزمية من الحل الأمثل.

تظهر دراسة النتائج أنّ الاستقرار المحلي يكون في قيمته العظمى كلما اقترب مركز عطالة الجسم العلوي من نقطة الخصر، كما تكون نسبة تقسيم القدم في هذه الحالة بحيث تكون نقطة الكاحل على بعد 60% من طول القدم الكلي عن إصبع القدم، ومركز عطالة الساق أبعد ما يكون عن الركبة، وتكون نسبة تقسيم الرجل بحيث يكون حوالي 60% للفخذ.



الشكل 3-9: نتائج تقارب خوارزمية الأمثلة من أجل تابع الكلفة المرتبط بالاستقرار المحلي.

3-4-2-1-2 الاضطراب الأعظمي في استوائية الأرض

نعرف تابع الكلفة في هذه الحالة بالشكل:

$$\text{costFunction} = -e_{\max} \quad (3.17)$$

حيث تمثل e_{\max} ارتفاع العتبة التي يمكن للروبوت تجاوزها.

يعرض الجدول 3-5 أحد نتائج الأمثلة التي حصلنا عليها من أجل تابع الكلفة المتعلق بالاضطراب الأعظمي في استوائية الأرض، حيث يكون الروبوت قادرًا على تجاوز عتبة بارتفاع 0.019 وهو ما يقارب 1.9% من طول الرجل الكلي، ويحتوي الجدول أيضًا قيم معاملات الأداء الأخرى من أجل هذه النتائج، ويبين الشكل 3-10 تقارب الخوارزمية من الحل الأمثل.

تظهر دراسة النتائج أن تابع الكلفة يقترب من قيمته العظمى كلما ابتعد مركز عطالة الجسم العلوي عن نقطة الخصر، ومركز عطالة الفخذ أقرب ما يكون من الركبة، وكذلك الأمر بالنسبة إلى مركز عطالة الساق، وتكون نقطة الكاحل في منتصف القدم.

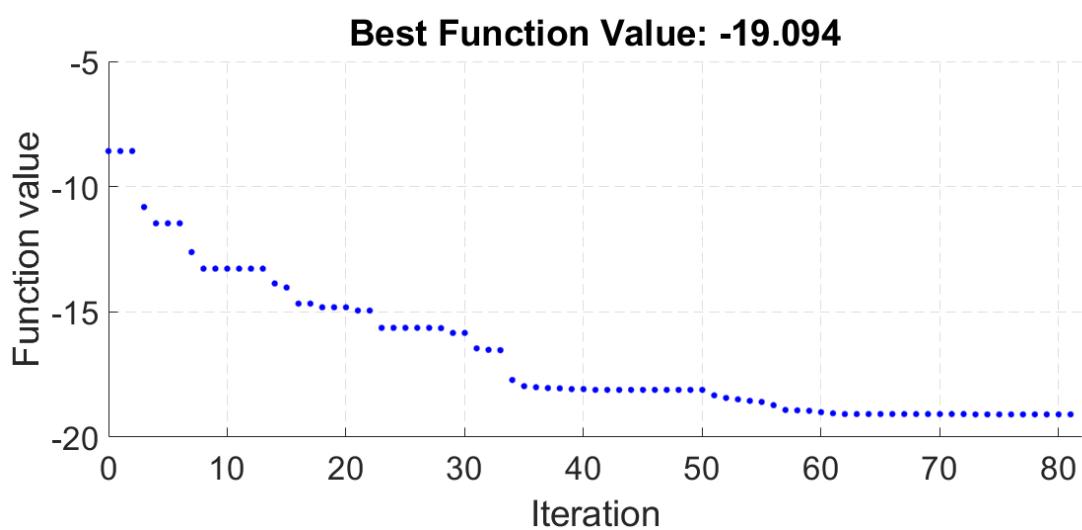
الجدول 3-5: نتائج الأمثلة باستخدام تابع كلفة مرتبط بمعامل أداء وحيد.

(1): أمثلة بتابع كلفة مرتبط بالاستقرار المحلي.

(2): أمثلة بتابع كلفة مرتبط بالصلادة ضد الاضطراب في استوائية الأرض.

(3): أمثلة بتابع كلفة مرتبط بالسرعة.

Parameter	(1)	(2)	(3)
p_1	0.597	0.596	0.591
p_2	0.794	0.790	0.695
p_3	0.118	0.165	0.182
p_4	0.745	0.305	0.300
p_5	0.049	0.065	0.050
p_6	0.213	0.200	0.200
p_7	0.607	0.500	0.500
p_8	0.038	0.015	0.015
p_9	0.387	0.493	0.469
p_{10}	0.083	0.076	0.081
p_{11}	0.120	0.159	0.167
p_{12}	0.082	0.075	0.080
λ_m	0.001	0.890	0.498
Fr	0.239	0.261	0.287
e_{\max}	0.009	0.019	0.007



الشكل 3-10: نتائج تقارب خوارزمية الأمثلة من أجل تابع الكلفة المرتبط بتجاوز العوائق.

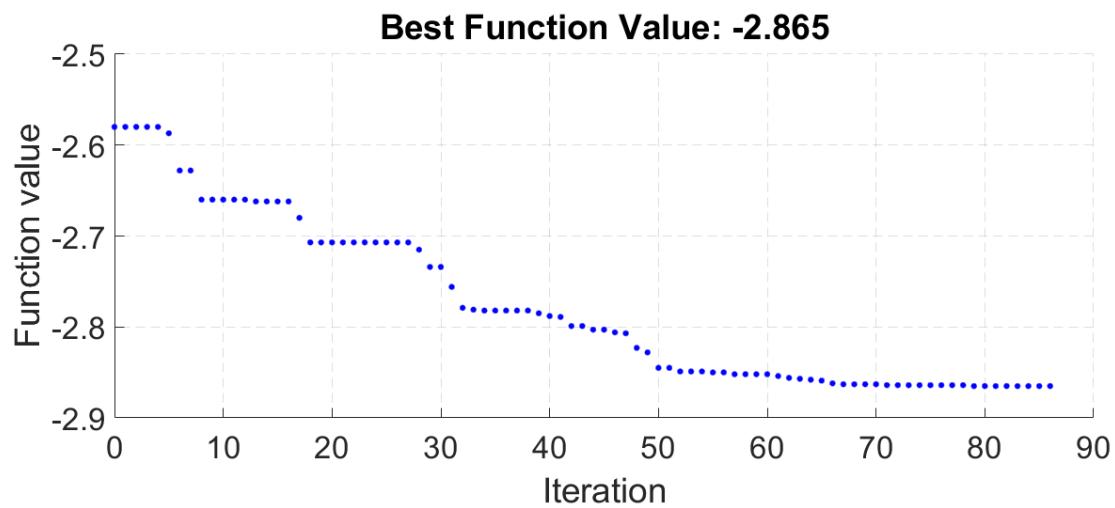
3-1-4-3 سرعة الحركة

نعرف تابع الكلفة في هذه الحالة بالشكل:

$$\text{costFunction} = -Fr \quad (3.18)$$

يعرض الجدول 3-5 النتائج التي حصلنا عليها من أجل تابع الكلفة المتعلق بسرعة الحركة، حيث يكون الروبوت قادرًا على الوصول إلى سرعة عظمى ممثلة بـ رقم فرود 0.287، ويحتوي الجدول أيضًا قيم معاملات الأداء الأخرى من أجل هذه النتائج، ويبين الشكل 3-11 تقارب الخوارزمية من الحل الأمثل.

تظهر دراسة النتائج أن هذا التابع يقترب من قيمته العظمى كلما ابتعد مركز عطالة الجسم العلوي عن نقطة الخصر، كما تكون نسبة تقسيم القدم في هذه الحالة بحيث تكون نقطة الكاحل في منتصف القدم، كما نلاحظ انخفاض مركز عطالة الفخذ عن نقطة الخصر واقتراب مركز عطالة الساق من الركبة. يمكن أن نفسّر ذلك في حال شبّهنا تصوّف الرجل أثناء تأرجحها بنواص مقلوب فانخفض مركز العطالة يزيد من زاوية التأرجح ولكن بالمقابل يجب أن يكون مركز عطالة الساق مرتفعاً حتى يصبح بالإمكان قفل الركبة قبل اصطدام الرجل المتّأرجحة مع الأرض، وتكون كتلة الفخذ كبيرة نسبياً (16% من وزن الروبوت الكلي)، وتكون نقطة الكاحل في منتصف القدم.



الشكل 3-11: نتائج تقارب خوارزمية الأمثلة من أجل تابع الكلفة المرتبط بالاستقرار المحلي.

4-1-4-3 مناقشة نتائج الأمثلة بتابع كلفة وحيد

نلاحظ من دراسة النتائج السابقة في حالات تتابع الكلفة الثلاث والمقارنة فيما بينها أنه يمكن اعتماد مجموعة من المعايير عند تصميم الروبوت بهدف تحسين الأداء قدر الإمكان، وهذه المعايير كالتالي:

1. رفع مركز عطالة الجسم العلوي يساهم في تحسين الأداء من أجل المعاملات الثلاث.
2. تقسيم الرجل بحيث يجعل طول الفخذ حوالي 60% من طول الرجل الكلي.
3. جعل مفصل الكاحل في متصف القدم.
4. جعل طول القدم حوالي 20% من طول الرجل الكلي.

4-2 أمثلة معاملات الاستقرار والسرعة بتابع كلفة وحيد مرتبطة بعده

معاملات أداء

نقوم ببناء تابع كلفة موزن بهدف الوصول إلى حل أمثلة وحيد يؤمن توازناً بين عدة معاملات أداء مختلفة. يتم بناء هذا التابع الموزن بدمج مجموعة من معاملات الأداء بتشغيل مختلف لكل معامل حسب أهمية هذا المعامل بالنسبة للمصمم. ونكتب تابع الكلفة في هذه الحالة:

$$C = \sum_{j=1}^m \omega_j \times I_j; \left(\sum_j \omega_j = 1 \right) \quad (3.19)$$

من أجل المسألة المطروحة ضمن هذا البحث، نعرف تابع الكلفة الموزن كالتالي:

$$C = \omega_1 \times \frac{Fr - Fr^{\min}}{Fr^{\max} - Fr^{\min}} + \omega_2 \times \frac{\lambda_m^{\max} - \lambda_m^{\min}}{\lambda_m^{\max} - \lambda_m^{\min}} + \omega_3 \times \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\max}^{\max} - e_{\max}^{\min}} \quad (3.20)$$

حيث: ω_i^{\max} هي القيمة الأمثلية للمعيار المعتمد التي تم الوصول إليها عن طريق الأمثلة بمعيار وحيد، ω_i^{\min} هي القيمة التقديرية للحد الأدنى للمعيار المعتمد.

تعود عملية اختيار الأوزان ω_i للمصمم بحسب تقديره لأهمية كل من المعاملات بالنسبة لتصميمه، فمثلاً في حالة الاهتمام بمعاملات الاستقرار بشكل أكبر من المعامل المرتبط بالسرعة وذلك بهدف تقليل تأثير الارتيابات والخلوصات على استقرار الروبوت قدر الإمكان نختار التوزيع وفق القيم التالية:

$$\omega_1 = 0.2, \omega_2 = 0.6, \omega_3 = 0.2$$

حيث نعطي أهمية قصوى لتجاوز الاضطرابات الصغيرة حول مسار العمل الإسمى للروبوت المعرف بالحلقة الحدية من أجل دخل طaci ثابت. يبيّن الجدول 3-6 النتائج في هذه الحالة. وتكون قيم معاملات الأداء في هذه الحالة كالتالي:

$$Fr = 0.252, e_{\max} = 0.011, \lambda_3 = 0.017$$

الجدول 3-6: نتائج الأمثلة باستخدام تابع كلفة وزن يعطى أهمية أكبر للاستقرار المحلي للروبوت.

p_1	0.539	p_5	0.061	p_9	0.454
p_2	0.762	p_6	0.213	p_{10}	0.100
p_3	0.143	p_7	0.562	p_{11}	0.132
p_4	0.432	p_8	0.042	p_{12}	0.085

يمكن العمل على زيادة الاستقرار المحلي أو بالنسبة للاضطرابات التي يخضع لها الروبوت أثناء حركته باستخدام خوارزميات التحكم والتي ندرسها في الفصول القادمة، ولذلك نرى أنه يجب التركيز عند اختيار معاملات التصميم الميكانيكي التي تمت مناقشتها في هذا الفصل على الأداء الديناميكي من ناحية سرعة الحركة، إضافةً إلى الأداء الطaci للروبوت في ظروف الحركة العادية بدون اضطرابات. إذًا

نعرف تابع الكلفة الموزن في هذه الحالة بالشكل التالي:

$$C = \omega_1 \times \frac{Fr - Fr^{\min}}{Fr^{\max} - Fr^{\min}} + \omega_2 \times \frac{\lambda_m^{\max} - \lambda_m^{\min}}{\lambda_m^{\max} - \lambda_m^{\min}} + \omega_3 \times \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\max}^{\max} - e_{\max}^{\min}} + \omega_4 \times \frac{1}{1 + \beta} \quad (3.21)$$

ونختار معاملات التوزين بحيث نعطي أهمية عظمى لسرعة الحركة والأداء الطaci كالتالي:

$$\omega_1 = 0.40, \omega_2 = 0.10, \omega_3 = 0.10, \omega_4 = 0.40$$

يبيّن الجدول 3-7 نتائج الأمثلة في هذه الحالة. وتكون قيم معاملات الأداء في هذه الحالة كالتالي:

$$Fr = 0.297, e_{\max} = 0.021, \lambda_3 = 0.178, \beta = 0.1$$

الجدول 3-7: نتائج الأمثلة باستخدام تابع كلفة وزن يعطى أهمية أكبر لسرعة الحركة والأداء الطaci.

p_1	0.506	p_5	0.057	p_9	0.400
p_2	0.797	p_6	0.224	p_{10}	0.074
p_3	0.176	p_7	0.500	p_{11}	0.157
p_4	0.301	p_8	0.015	p_{12}	0.088

3-4-3 أمثلة الأداء الطاقي للنموذج المعتمد غير المفعّل عند نقطة عمل إسمية معرفة بتردد وطول خطوة الحركة

ذكرنا سابقاً أن النموذج غير المفعّل يعتمد على ديناميكيه الداخلي في أداء حركته على المنحدر المائل، يوصي هذا الديناميكي الداخلي بطول وتردد خطوة الروبوت أثناء حركته من أجل دخل طاقي ثابت.

كما درسنا في الفقرات السابقة أمثلة معاملات التصميم الميكانيكي التي تعطي الأداء الأفضل من أجل مجموعة من معاملات الأداء. تمت إجرائية الأمثلة السابقة بتغيير معاملات التصميم الميكانيكي، وبالتالي يمكن القول أن هذه العملية هي عملية أمثلة للديناميكي الطبيعي للوصول إلى الأداء الأفضل. وهنا يمكن أن نطرح السؤال التالي: هل يمكن تعديل معاملات التصميم الميكانيكي بحيث تحافظ على الديناميكي الطبيعي نفسه ولكن تحصل على أداء طاقي أو استقرار محلي أو صلادة ضد الاضطرابات في استوائية الأرض أفضل. يمكن النظر إلى عملية الأمثلة في هذه الحالة كعملية بحث عن توزع كتل وأطوال الأجسام وثوابت صلابة التوابع المشكّلة للنموذج الروبوتي التي تعطي الأداء الأفضل عند نقطة عمل إسمية معرفة بطول وتردد خطوة ثابتين. وهذه العملية مهمة كونها تمكّننا من دراسة الاستقرار والأداء الطاقي بعزل تأثيرات سرعة الحركة على معاملات الأداء، إضافةً إلى أنها ضرورية في حالة بناء نموذج روبوتي يعمل عند نقطة عمل إسمية محددة بأفضل أداء ممكن.

سندرس كمثال عن الحالة السابقة أمثلة الأداء الطاقي للنموذج الروبوتي غير المفعّل عند نقطة العمل الإسمية المحددة بالمعاملين:

$$Fr_0 = 0.27, d_0 = 0.9$$

حيث: d_0, Fr_0 هما رقم فرود وطول الخطوة على الترتيب. حيث استعرضنا عن التردد بسرعة الحركة لأن سرعة الحركة تعرف بطول الخطوة مضروبة بالتردد.

نعرف تابع الكلفة في هذه الحالة بالشكل التالي:

$$C = \frac{\omega_1}{1+10\times|Fr - 0.27|} + \frac{\omega_2}{1+10\times|d - 0.9|} + \times \frac{\omega_3}{1+3\times\beta} \quad (3.21)$$

نختار معاملات التوزين كالتالي:

$$\omega_1 = 0.35, \omega_2 = 0.35, \omega_3 = 0.30$$

تمت عملية اختيار المعاملات المختلفة لتابع الكلفة بناءً على عدة تجارب للوصول إلى الأداء الأفضل.

يبين الجدول 3-8 نتائج الأمثلة في هذه الحالة. وتكون قيمة الأداء الطافي الموصّف بميل المنحدر كالتالي:

$$\beta = 0.076 \text{ rad}$$

الجدول 3-8: نتيجة الأمثلة باستخدام تابع الكلفة موزّن من أجل نقطة عمل إسمية.

p_1	0.506	p_5	0.057	p_9	0.400
p_2	0.797	p_6	0.224	p_{10}	0.074
p_3	0.176	p_7	0.500	p_{11}	0.157
p_4	0.301	p_8	0.015	p_{12}	0.088

3-5 مناقشة نتائج الدراسة التصميمية للروبوت ثنائي الأرجل بسبعة أجسام

تعتبر الروبوتات ثنائية الأرجل المعتمدة على ديناميكتها الداخلي في أداء حركة السير على رجلين من الحلول الواحدة في بناء نماذج لهذا النمط من الحركات، وذلك لما تحققه من وفر كبير بالطاقة إضافةً إلى مشابهتها لحركة البشر، كما أنَّ دراسة الحركة المولدة بهذه الطريقة يساعِم في فهم ديناميكيَّة حركة الإنسان. تعاني الطريقة السابقة في الحركة من عدة نقاط ضعف تمثل في عدم صلادتها ضد الاضطراب وعدم تنوع الحركات، فكان الهدف من البحث في هذا الفصل هو أمثلة معاملات التصميم الميكانيكي لروبوت غير مفعَّل، بهدف الحصول على أداءً أمثلٍي لناحية معاملات أداء ترتبط بالاستقرار المحلي والصلادة ضد الاضطراب الممثل بتغيير في ارتفاع الأرض التي يتحرك عليها الروبوت، إضافةً إلى زيادة سرعة حركة الروبوت من أجل أفضل أداء طافي ممكِّن.

قمنا ببدايةً بتعريف مسألة الأمثلة واستخدمنا خوارزمية عناصر السرب كخوارزمية للأمثلة الشاملة نظراً للطبيعة المتقطعة لتابع الكلفة. بتطبيق إجرائية الأمثلة المعتمدة مع دراسة النتائج توصلنا إلى مجموعة من الملاحظات يمكن تلخيصها بالنقاط التالية:

- بالنسبة للأطوال النسبية للأجسام المشكّلة للروبوت: باعتماد طول الفخذ حوالي 50% من طول الرجل الكلي، وطول القدم حوالي 22% ~ 20 من طول الرجل الكلي مع جعل مفصل الكاحل في منتصف القدم فإنّ هذا يعطي أفضل أداء ديناميكي.
- بالنسبة لمراكز عطالة الأجسام المشكّلة للروبوت: القيم الأمثلية توافق جعل مركز عطالة الجسم العلوي حوالي 45% ~ 40 من طول الرجل الكلي، ومركز عطالة الفخذ على بعد حوالي ~ 75 80% من طول الفخذ عن نقطة الخصر، ومركز عطالة الساق على بعد 30% من طول الساق عن نقطة الركبة.
- بالنسبة لكتل الأجسام المشكّلة للروبوت: فرضنا في دراستنا أن كتلة الجسم تمثّل 50% من كتلة الروبوت الكلي حيث نجد أنه في حال بناء نموذج حقيقي سيتم توضيع كل المعدات الخاصة بالتحكم والطاقة في الجسم العلوي، وبالتالي يجب أن تتم الدراسة بفرض كتلة كبيرة للجسم العلوي. بناءً على الدراسة الناتجة يجب جعل كتلة الفخذ حوالي 17% من كتلة الروبوت الكلي وكتلة الساق حوالي 6% من الكتلة الكلية.

6-3 الخلاصة

قمنا في هذا الفصل بدراسة أمثلة معاملات التصميم الميكانيكي لنموذج حاسوبي لروبوت ثنائي الأرجل غير مفعّل بست درجات حرية مكون من رجلين مع ركبتين وقدمين مسطحتين ومفاصل مرنة. يملك النموذج أيضاً جسماً علويّاً يخضع لقيود ديناميكية بحيث يبقى محافظاً على وضعية وسطية بين الرجلين ويستمد الروبوت الطاقة اللازمة من حركته على منحدر. تمت إجرائية الأمثلة باستخدام خوارزمية عناصر السرب كخوارزمية إحصائية للاقتراب من الحل العمومي الأمثل وباستخدام خوارزمية البحث بالأنمات العمومية GPS للتقارب من القيمة الدقيقة للحل الأمثل وباعتماد عدّة توابع كلفة ترتبط بالاستقرار حول النقطة الثابتة ومقدار التغييرات في استواء الأرض الذي يمكن للروبوت تجاوزه وبالإضافة لسرعة حركة الروبوت والأداء الطافي له.

الفصل الرابع

دراسة التحكم بالروبوتات ثنائية

الأرجل القائمة على مبدأ عدم

التفعيل

أنجزنا في الفصل السابق دراسة تصميمية للروبوتات ثنائية الأرجل غير المفعّلة قادتنا إلى اختيار معاملات التصميم الميكانيكي لهذا الروبوتات بشكل أمثل يبناءً على عدّة معاملات تتضمن الاستقرار والصلادة ضد الاضطراب وسرعة الحركة. نحاول في هذا الفصل دراسة الانتقال من الحالة غير المفعّلة إلى الحالة المفعّلة، حيث تتطلب عملية الانتقال اختيار طريقة التحكم المناسبة واختيار معاملات التحكم التي تعطي الأداء الأفضل وفق مجموعة معاملات الأداء.

1-4 مقدمة

دلت دراسات سابقة [24,56,57] على أهمية تغيير المرونة في تغيير الديناميكي الداخلي للنماذج الروبوتية ذات الرجلين المعتمدة على مبدأ عدم التفعيل، مما يساهم في تعديل أنماط الحركة لهذه الروبوتات مع تحقيق الوفر الطاقي. إضافةً إلى أهمية استخدام المفاعلات المرنة في زيادة صلادة التصاميم الميكانيكية ضد الصدم [23]. من ناحية أخرى، شجع النمط الدوري لحركات المشي على استخدام مولدات النمط المركزية لتوليد حركات مستقرة للروبوتات ثنائية الأرجل، ودلت الدراسات على أنه يمكن لهذه النماذج أن تزيد الصلادة ضد الاضطراب مع إمكانية التغيير بين أنماط الحركة المختلفة [29,24].

بناءً على ما سبق تبيّن أهمية الدمج بين مفهومي المفاعلات المرنة التي تتمتع بإمكانية تغيير مرونة الروابط ومفهوم مولدات النمط المركزية للاستفادة من خصائص كلا المفهومين.

نقدم في بداية هذا الفصل دراسة مرجعية تتعلق بطرق التحكم المعتمدة على استخدام مولدات النمط المركزية ذات الأساس البيولوجي، ونطرق بعد ذلك إلى مسألة بناء خوارزمية تستخدم هذه المولدات للتحكم بمفاعلات النموذج الروبوتي المدروس في الفصل السابق بطريقة ندمج فيها بين إيجابيات التحكم باستخدام مولدات النمط المركزية وإيجابيات الحركة غير المفعولة المعتمدة على الديناميكي الداخلي.

2-4 مولدات النمط المركزية

كما ذكرنا سابقاً يستخدم مفهوم مولدات النمط المركزية CPG بشكل شائع في علم الأحياء، وهي عبارة عن خلايا عصبية موجودة في النخاع الشوكي للفقاريات وفي العقد القطعية لغير الفقاريات [28] ما يميّز هذه الخلايا هو قدرتها على توليد أنماط دورية من الإشارات توافق حركات الانتقال لمختلف الكائنات كتحريك الأرجل أثناء حركة المشي عند رباعيات الأرجل [32]. يتم تفعيل هذه الخلايا باستخدام إشارات كهربائية من الجهاز العصبي المركزي العلوي، وبتغيير شدة هذه الإشارة يمكن التحكم بسرعة المشي. بنيت العديد من النماذج لتمثيل هذه المהتزات رياضياً [30] وتم الاستفادة من أنماطها الدورية في التحكم بالنماذج الروبوتية [31,32].

إن التخفيض الكبير في عدد إشارات التحكم والقدرة على الانتقال بين أنماط مختلفة للحركة باستخدام عدد محدود من إشارات التحكم [28]، إضافةً إلى صلادة هذه الأنماط ضد الاضطراب [29]، كل ما سبق جعل هذه النماذج محظ اهتمام لتوليد حركة المشي في الروبوتات ذات الرجلين. استخدم خرج هذه المهتزات لتوليد إشارات دورية للتحكم بعزم محركات روابط الروبوتات [29]، أو زواياها [58]، أو سرعاتها الزاوية [59] أو من خلال تحديد الإحداثيات الديكارتية لأجسام هذه الروبوتات ليتم تحويل هذه الإحداثيات عن طريق النموذج الهندسي العكسي إلى إحداثيات رابطية [60]. ونهايةً قام Huang [25] باستخدام مولدات النمط المركزية للتحكم بعزم وثوابت صلابة الروابط المرنة لنموذج روبوت مستوى.

على الرغم من بساطة التحكم وال الحاجة إلى إشارة وحيدة لتحديد أنماط الاهتزاز لمولدات النمط المركزية، فإن عدد المعاملات الالزامية لتحقيق الأنماط الدورية المطلوبة لتوليد حركة مستقرة وفق عدة معايير محددة كبيرة، وتشمل هذه المعاملات معاملات النموذج الرياضي الموصّف لكل مهتز ومعاملات التأثير المتبادل بين هذه المهتزات. يزداد عدد هذه المعاملات كلما ازداد عدد درجات حرية النموذج الروبوتي المعتمد. استخدمت العديد من الطائق بهدف إيجاد القيم المناسبة لهذه المعاملات بعضها يعتمد على الخوارزميات التطورية كالخوارزمية الجينية [61,59] وخوارزمية عناصر السرب [61]، ويعتمد بعضها الآخر على التعلم المعزّز [62] وغيرها.

4-3 نموذج Huang للتحكم بالروبوتات ثنائية الأرجل القائمة على مبدأ عدم التفعيل

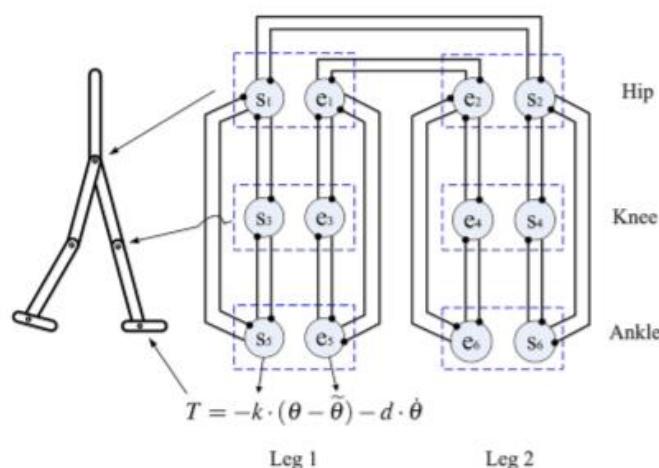
عدم التفعيل

كما ذكرنا سابقاً يقوم نموذج Huang على التحكم الثنائي عزم-مرنة باستخدام مولدات النمط المركزية، حيث استند في دراسته على ملاحظات بيّنت أن الإنسان أثناء حركته يغيّر في الديناميكي الداخلي للجسم لموائمة الحركة الدورية للمهتز، ودراسات سابقة له بيّنت أهمية تعديل الديناميكي الداخلي للروبوت في تعديل أنماط الحركة المولدة، والانتقال بين السرع أثناء الحركة [24].

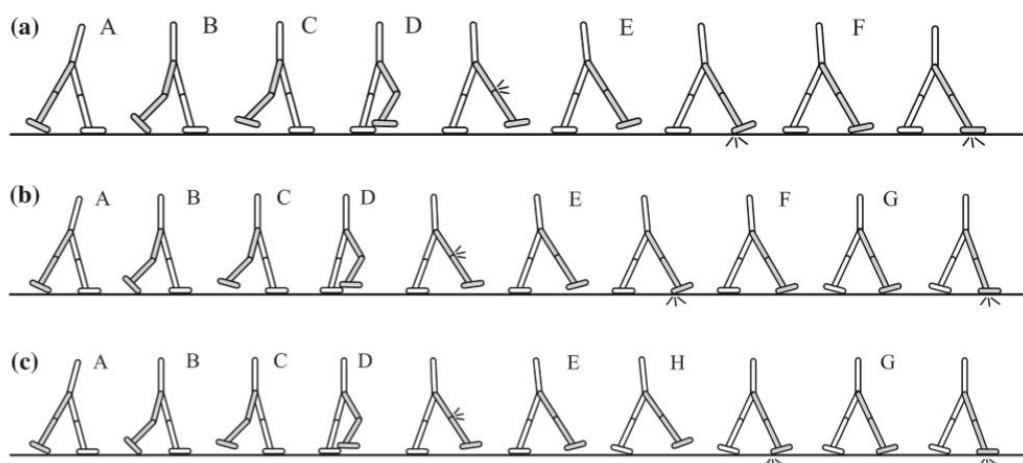
أعطى النموذج المقترن نتائج جيدة متفوّقاً على غيره من النماذج من حيث التنوع في أنماط الحركة وأالية الانتقال بينها بشكل مباشر أثناء الحركة، إضافة إلى ذلك أظهر النموذج صلادة جيدة ضد

الاضطراب متمثلاً بتغيرات في استوائية الأرض التي يتحرك عليها الروبوت حيث قارن Huang بين الأداء في حالة تطبيق النموذج والنتائج في حالة تطبيق تحكم تقليدي مستخدم في دراسات سابقة وكان تفوق النموذج واضحًا من ناحية الأداء.

يبيّن الشكل 4-1 نموذج Huang المستخدم في عملية التحكم، ويظهر الشكل المهزّات المستخدمة للتحكم بكل مفعّل والإشارات المتبادلة فيما بينها، حيث يتم إسناد قيم مختلفة لمعاملات هذا النموذج في كل طور من أطوار الحركة الموافقة لسيناريوهات المشي المبيّنة في الشكل 4-2.



الشكل 4-1: نموذج Huang للتحكم الثنائي عزم — مرونة باستخدام مولدات النمط المركزية [25].



الشكل 4-2: مخطط توضيحي لأنماط المشي الثلاثة المعتمدة في دراسات Huang لبناء نموذج التحكم الثنائي عزم — مرونة باستخدام مولدات النمط المركزية [25].

4-4 النموذج المقترن

اخترنا في عملنا استخدام مولدات النمط المركبة CPG للتحكم بحركة النموذج ثنائي الأرجل بست درجات حرية والمكون من سبعة أجسام (الفصل 2)، وذلك للتحكم بعزم مفاصل الحركة ومرونتها بشكل مشابه لنموذج Huang، مع السعي لتبسيط النموذج قدر الإمكان مع تحفيض عدد المعاملات بما يمكن من استخدام خوارزمية تطورية بتابع كلفة محددة بهدف تحديد خواص هذه الطريقة في التحكم ومرونتها وقدرتها على تحقيق أنماط مختلفة من الحركة.

نقترح مجموعة من التعديلات على نموذج Huang [25,26] بهدف تبسيط النموذج قدر الإمكان، حيث نعتمد نموذجاً واحداً لجميع أطوار الحركة عوضاً عن ارتباط نموذج التحكم بأطوار الحركة مما يقلل من عدد المعاملات الالزامية لبناء النموذج، ويمكن من استخدام الخوارزميات التطورية في إيجاد المعاملات والتي يمكن الاعتماد عليها في الحصول على الأداء الأمثل وفق معايير أمثلة مختلفة، إضافةً إلى إلغاء القيد الديناميكي المسؤول عن توضيع الجسم العلوي في وضعية وسطية بين الرجلين والذي يساهم برأينا في تسهيل عمليات بناء التحكم إلا أنه يقلل من قدرات الروبوت.

4-4-1 توصيف نموذج التحكم المستخدم

يقوم نموذج التحكم المقترن بشكل مشابه للنموذج المقترن من قبل Huang على التحكم بكل رابطة من الروابط باستخدام مهتزين؛ يتحكم الأول بعزم الرابطة بينما يتحكم الثاني بمرنة الرابطة، ويعطي عزم كل رابطة بالمعادلة التالية:

$$T_i = (k_{si} + k_i) \cdot (\theta_i - \tilde{\theta}_i^e) + d_i \cdot \dot{\theta}_i \quad (4-1)$$

حيث: k_{si} قيمة ثابتة محددة مسبقاً لمرنة كل رابطة من الروابط.

k_i مرنة الرابطة ويتم التحكم بها باستخدام المتحكم العصبي.

$\tilde{\theta}_i^e$ نقطة توازن الرابطة ويتم التحكم بها باستخدام المتحكم العصبي.

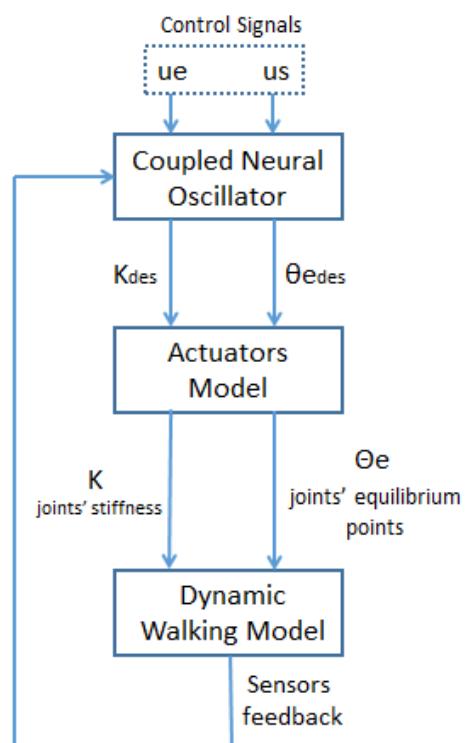
$\dot{\theta}_i$ الزاوية والسرعة الزاوية النسبتين للرابطة.

d_i معامل التخادم لكل رابطة من الروابط.

لا يطبق خرج المهتزات بشكل مباشر على النموذج الديناميكي للروبوت، بل نأخذ بعين الاعتبار استجابة المحركات المسؤولة عن التحكم بمرونة الروابط ونقاط توازنها، ونمثلها بتتابع استجابة من الدرجة الأولى بثابت استجابة $\tau_a = 0.1\text{sec}$.

يتلقي النموذج العصبيوني معلومات من النموذج الروبوتي تتعلق بتحديد الرجل الساكنة والمتأرجحة خلال أطوار الحركة، إضافة إلى معلومات تتضمن الزاوية النسبية للأجسام المرتبطة بالنسبة لبعضها البعض وسرعها.

بناءً على ما سبق يمكن تمثيل النموذج الكلي للتحكم كما يبيّن الشكل 4-3.



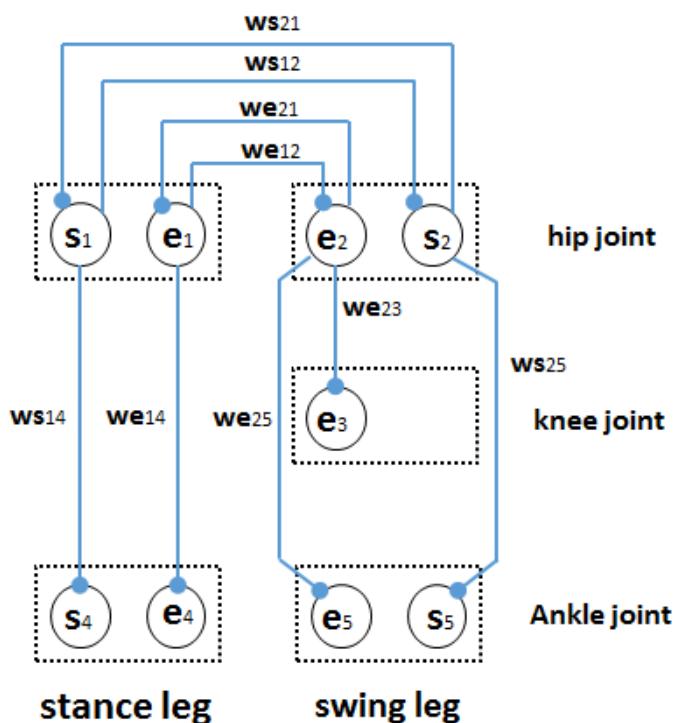
الشكل 4-3: هيكلية نموذج التحكم باستخدام مولدات النمط المركبة المقترن.

نقوم ببناء خوارزمية تحكم من تسعة مهتزات للتحكم بكامل النموذج المقترن؛ خمسة منها للتحكم بالرجل المتأرجحة في حال كانت الركبة محرّرة وأربعة للتحكم بالرجل الساكنة. يتم التحكم بمرونة والعزم في كل رابطة عن طريق مهتزين، باستثناء الركبة حيث نقوم بالتحكم فقط بالعزم المقدّم للرابطة.

نراعي أثناء التحكم بعض الحالات الخاصة، وتشمل هذه الحالات حالة قفل الركبة حيث يلغى فيها أثر المهتز المرتبط بالركبة، وحالة القدم المتراجحة حيث تُفرض قيمة ثابتة لزاوية التوازن للرابطة في هذه الحالة في طور التأرجح مع ركبة غير مفولدة، بينما تُعد قيمة هذه الزاوية بعد الصدم وقفل الركبة.

يتم التحكم بالنموذج العصبيوني بإشارتي دخل w مسؤولة عن التحكم بعزم الروابط و e مسؤولة عن التحكم بمرونة هذه الروابط، على خلاف النماذج الأخرى التي تتحكم فقط بعزم الروابط ويتم التحكم فيها بإشارة دخل وحيدة.

يتم التأثير المتبادل بين المهتزات في رגלי الروبوت بين المهتزات المسؤولة عن التحكم بروابط الفخذ، بينما، وضمن الرجل الواحدة، يتم التأثير المتبادل بين المهتزات بحيث يتأثر مهتز كل رابطة بمهتزات الروابط في المستوى الأعلى بشكل مشابه للنماذج المستخدمة في [29,59]، يبيّن الشكل 4-4 هيكلية النموذج العصبيوني المستخدم وروابط التأثير المتبادل بين المهتزات المختلفة.



الشكل 4-4: هيكلية النموذج العصبيوني المقترن.

تم الوصول إلى هذه الهيكلية بشكل تدريجي وبعد إجراء العديد من التجارب المبدئية وصولاً إلى الصيغة النهائية المطروحة في هذا البحث.

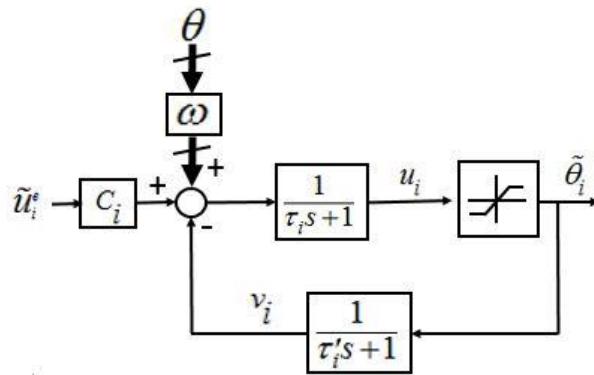
4-4-2 النموذج الرياضي للمهتزات

لتمثيل المهزات، نعتمد المهتز المعتمد من قبل Matsuoka [63] والمستخدم في دراسات مختلفة للتحكم بحركة الروبوتات ثنائية الأرجل [25,29,59,61]، حيث يوصّف المهتز المستخدم للتحكم بنقطة التوازن لكل رابطة بالمعادلات التالية:

$$\dot{u}_i^e = \frac{1}{\tau_i^e} (c_i^e \tilde{u}_i^e - u_i^e + \sum_{j,j \neq i} \omega_{ij}^e \tilde{\theta}_j - \beta^e v_i^e + Feed_i^e(q, \dot{q}))$$

$$\dot{v}_i = \frac{1}{\tau_i'^e} (-v_i^e + \tilde{\theta}_i) \quad (4-2)$$

$$\tilde{\theta}_i = \begin{cases} -\pi/2, & u_i^e < -\pi/2 \\ u_i^e, & -\pi/2 \leq u_i^e \leq \pi/2 \quad i=1,2,\dots,5 \\ \pi/2, & u_i^e > \pi/2 \end{cases}$$



الشكل 4-5: نموذج العصبون المستخدم والمعتمد على نموذج Matsuoka.

حيث: i يمثل رقم الرابطة (الشكل 4-3)، u_i^e, v_i^e متحوّلات الحالة للمهتز، $\tilde{\theta}$ خرج المهتز العصبيوني (نقطة توازن الرابطة)، \tilde{u}_i^e إشارة الدخل، $\tau_i^e, \tau_i'^e$ ثوابت زمنية، β^e معامل التوفيق المتبدال، c_i^e توزين لإشارة الدخل، ω_{ij}^e أوزان التأثير المتبدال بين العصبونات، $Feed_i^e$ إشارات راجعة من الرابطة المتحكم بها تتضمن معلومات عن الوضع الزاوي والسرعة الزاوية.

يوصّف المهتز المستخدم للتحكم بمرونة الروابط بالمعادلات التالية:

$$\begin{aligned}\dot{u}_i^s &= \frac{1}{\tau_i^s} (c_i^s \cdot \tilde{u}_i^s - u_i^s + \sum_{j,j \neq i} \omega_{ij}^s k_j - \beta^s v_i^s + Feed_i^s(q, \dot{q})) \\ \dot{v}_i^s &= \frac{1}{\tau_i'^s} (-v_i^s + k_i) \quad (4-3) \\ k_i &= \begin{cases} -10, & u_i^s < -10 \\ u_i^s, & -10 \leq u_i^s \leq 10, i = 1, 2, 4, 5 \\ 10, & u_i^s > 10 \end{cases}\end{aligned}$$

تحمل ثوابت المعادلات السابقة معنى مشابهاً للمعاملات المستخدمة في المعادلات (2-4). نحد قيمة خرج المهتز ضمن المجال $[10, -10] Nm.rad^{-1}$ مع التذكير أن هذه القيمة تمثل ازياح قيمة المرونة عن القيمة الإسمية المحددة لكل رابطة.

تلقى المهتزات إشارات راجعة من الحساسات المرتبطة بروابط هذه الحساسات تتضمن هذه الإشارات الوضع الزاوي النسبي لهذه الروابط والسرع الزاوية الموافقة.

3-4-4 معاملات النموذج التحكمي

بناءً على الوصف المقدم في الفقرة السابقة وعلى النموذج المستخدم نكتب معادلات النموذج العصبي المسؤول عن التحكم بنقطة التوازن بالشكل التالي:

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} \tau_{\text{hip}}^e \cdot \dot{u}_1^e \\ \tau_{\text{hip}}^e \cdot \dot{u}_2^e \\ \tau_{\text{knee}}^e \cdot \dot{u}_3^e \\ \tau_{\text{foot}}^e \cdot \dot{u}_4^e \\ \tau_{\text{foot}}^e \cdot \dot{u}_5^e \end{pmatrix} &= \tilde{u}^e \begin{pmatrix} c_1^e \\ c_2^e \\ c_3^e \\ c_4^e \\ c_5^e \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_1^e \\ u_2^e \\ u_3^e \\ u_4^e \\ u_5^e \end{pmatrix} - \beta^e \begin{pmatrix} V_1^e \\ V_2^e \\ V_3^e \\ V_4^e \\ V_5^e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \omega_{12}^e & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{21}^e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_{32}^e & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{41}^e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_{52}^e & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\theta}_1 \\ \tilde{\theta}_2 \\ \tilde{\theta}_3 \\ \tilde{\theta}_4 \\ \tilde{\theta}_5 \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} g_{ep}^{\text{hip}} \cdot (\theta_{t1} - \theta_b) + g_{ed}^{\text{hip}} \cdot (\dot{\theta}_{t1} - \dot{\theta}_b) \\ g_{ep}^{\text{hip}} \cdot (\theta_{t2} - \theta_b) + g_{ed}^{\text{hip}} \cdot (\dot{\theta}_{t2} - \dot{\theta}_b) \\ g_{ep}^{\text{knee}} \cdot (\theta_{s2} - \theta_{t2}) + g_{ed}^{\text{knee}} \cdot (\dot{\theta}_{s2} - \dot{\theta}_{t2}) \\ g_{ep}^{\text{foot}} \cdot (\theta_{f1} - \theta_{s1}) + g_{ed}^{\text{foot}} \cdot (\dot{\theta}_{f1} - \dot{\theta}_{s1}) \\ g_{ep}^{\text{foot}} \cdot (\theta_{f2} - \theta_{s2}) + g_{ed}^{\text{foot}} \cdot (\dot{\theta}_{f2} - \dot{\theta}_{s2}) \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \tau'_{\text{hip}}^e \cdot \dot{V}_1^e \\ \tau'_{\text{hip}}^e \cdot \dot{V}_2^e \\ \tau'_{\text{knee}}^e \cdot \dot{V}_3^e \\ \tau'_{\text{foot}}^e \cdot \dot{V}_4^e \\ \tau'_{\text{foot}}^e \cdot \dot{V}_5^e \end{pmatrix} &= - \begin{pmatrix} V_1^e \\ V_2^e \\ V_3^e \\ V_4^e \\ V_5^e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tilde{\theta}_1 \\ \tilde{\theta}_2 \\ \tilde{\theta}_3 \\ \tilde{\theta}_4 \\ \tilde{\theta}_5 \end{pmatrix}, \tau'_i^e = \tau_i^e / 2 \quad (4-3)\end{aligned}$$

وبشكل مشابه نكتب النموذج المسؤول عن التحكم بمرونة الروابط بالشكل التالي:

$$\begin{aligned} \tau^s \begin{pmatrix} \dot{u}_1^s \\ \dot{u}_2^s \\ \dot{u}_4^s \\ \dot{u}_5^s \end{pmatrix} &= \tilde{u}^s \begin{pmatrix} c_1^s \\ c_1^s \\ c_2^s \\ c_2^s \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_1^s \\ u_2^s \\ u_4^s \\ u_5^s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \omega_{12}^s & 0 & 0 \\ \omega_{21}^s & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{41}^s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_{52}^s & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_4 \\ k_5 \end{pmatrix} - \beta^s \begin{pmatrix} v_1^s \\ v_2^s \\ v_4^s \\ v_5^s \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} g_{sp}^{hip} \cdot (\theta_{r1} - \theta_b) + g_{sd}^{hip} \cdot (\dot{\theta}_{r1} - \dot{\theta}_b) \\ g_{sp}^{hip} \cdot (\theta_{r2} - \theta_b) + g_{sd}^{hip} \cdot (\dot{\theta}_{r2} - \dot{\theta}_b) \\ g_{sp}^{foot} \cdot (\theta_{f1} - \theta_{s1}) + g_{sd}^{foot} \cdot (\dot{\theta}_{f1} - \dot{\theta}_{s1}) \\ g_{sp}^{foot} \cdot (\theta_{f2} - \theta_{s2}) + g_{sd}^{foot} \cdot (\dot{\theta}_{f2} - \dot{\theta}_{s2}) \end{pmatrix} \\ \tau'^s \begin{pmatrix} \dot{v}_1^s \\ \dot{v}_2^s \\ \dot{v}_4^s \\ \dot{v}_5^s \end{pmatrix} &= - \begin{pmatrix} v_1^s \\ v_2^s \\ v_4^s \\ v_5^s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_4 \\ k_5 \end{pmatrix}, \quad \tau'^s = \tau^s / 2 \quad (4-4) \end{aligned}$$

نلاحظ من المعادلات السابقة العدد الكبير للمعاملات التي يجب تحديد قيمها واللازمة لتحقيق حركة النموذج الروبوتي. تتضمن هذه المعاملات كما تبيّن المعادلات (4-3 و 4-4) معاملات التأثير المتبادل بين العصبوّنات المستخدمة وعددها تسعة، ومعاملات إشارات التحكم الواردة من الحساسات وعددها عشرة، والمعاملات الداخلية للمهتزات مع قيم إشارات الدخل (u_e, u_s) وعددها ثلاثة عشر، إضافةً إلى القيم الإسمية لثوابت صلابة التوابع في الروابط والتي ستتأرجح حولها قيمة المرونة وعددها ثلاثة، وقيمة الزاوية الثابتة لنقطة التوازن للقدم في طور التأرجح مع الركبة حرة، إضافةً إلى إحداثيات شعاع الحالة للحالة الابتدائية التي ينطلق منها الروبوت وعددها خمسة. فرضنا عدداً من الشروط على الحالة التي ينطلق منها الروبوت بهدف تقليل عدد معاملات الحالة البدائية قدر الإمكان، حيث اعتبرنا أن اللحظة التي ينطلق منها الروبوت هي نهاية طور الدفع بالقدم الخلفية نحو الأعلى وبداية طور التأرجح، كما فرضنا أن الجسم العلوي في نقطة البداية يكون في حالة وسطية بين الرجلين وسرعته هي القيمة الوسطى لسرعة الرجلين، كما أن القدم الأمامية تكون على تماس كامل مع الأرض في بداية الحركة وفي هذه الحالة يمكن تحديد الحالة الابتدائية للروبوت بخمسة متغيرات هي الموضع الراوی للرجل الخلفية وسرعتها الراویة وموضع القدم الخلفية وسرعتها الراویة والسرعة الراویة للرجل الأمامية. بالتالي يكون عدد المتغيرات الكلية مساوياً لـ 39 معامل. يبيّن الجدول 4-1 مجموعة المعاملات المراد إيجاد القيم الأمثلية لها ومجال تغييراتها.

إن العدد الكبير من المعاملات الموصفة للنموذج التحكمي يجعل عملية الوصول إلى قيمها المثالية عن طريق المحاولة والخطأ صعب جدًا ولذلك نجأ إلى استخدام الخوارزميات التطورية وبشكل محدد نستخدم خوارزمية عناصر السرب الأمثلية [51]، ويتم ذلك بتعريف مسألة أمثلة بتابع كلفة محدد بشكل مشابه للدراسات التصميمية.

4-4-4 صياغة مسألة الأمثلة

تتطلب صياغة مسألة الأمثلة تحديد مجال تغيرات معاملات التحكم المختلفة، إضافةً إلى تحديد تابع الكلفة المناسب للوصول إلى الأداء المطلوب.

نقوم بدايةً بتحديد مجالات تغيرات المعاملات المختلفة، حيث تم تحديد مجالات المعاملات بالاعتماد على دراسة النماذج المستخدمة في دراسات سابقة والمعتمدة على نموذج [29,25,58,64,65] Matsuoka. حيث اعتمدنا قيمًا قريبة من القيم المعتمدة في هذه الدراسات بما يخص معاملات المهازن المستخدم، أما بالنسبة للإشارات المتبادلة بين المهازن فقد تم تحديدها عن طريق القيام ببعض التجارب المبدئية باستخدام خوارزمية الأمثلة إضافةً إلى الاستفادة من هذه التجارب في تحديد الإشارات ذات التأثير المباشر على الاستقرار وحذف الإشارات غير المفيدة. كما تمت أيضًا الاستفادة من الدراسات على النموذج غير المفعل في تحديد مجالات منطقية لشاعر الحالة البدائية لحالة الروبوت ومجال تغيرات ثوابت صلابة التوابع في مفاصل الحركة المختلفة، ويبيّن الجدول 4-1 مجال تغيرات معاملات مسألة الأمثلة المعتمدة.

الجدول 4-1: المعاملات التصميمية للنموذج التحكمي مع مجال تغيراتها.

Parameters	Values Range
k_{s_hip}	[30, 70]
k_{s_knee}	[5, 15]
k_{s_feet}	[30, 50]
\tilde{u}^e	[1, 5]
\tilde{u}^s	[5, 50]
β^e, β^s	[1, 5]
$\tau_{hip}^e, \tau_{knee}^e, \tau_{feet}^e, \tau^s$	[0, 1]
$\omega_{12}^s, \omega_{21}^s, \omega_{41}^s, \omega_{52}^s$	[-0.5, 0.5]
$\omega_{12}^e, \omega_{21}^e, \omega_{32}^e, \omega_{41}^e, \omega_{52}^e$	[-5, 5]

$c_1^e, c_2^e, c_3^e, c_4^e, c_5^e$	$[-1,1]$
c_1^s, c_2^s	$[-1,1]$
$g_{ep}^{hip}, g_{ep}^{knee}, g_{ep}^{foot}, g_{ed}^{hip}, g_{ed}^{knee}, g_{ed}^{foot}$	$[-1,1]$
$g_{sp}^{hip}, g_{sp}^{foot}, g_{sd}^{hip}, g_{sd}^{foot}$	$[-100,100]$
θ_{t2}	$[-0.65, -0.4]$
$\dot{\theta}_{t2}$	$[-1.5, -0.2]$
$\dot{\theta}_{t1}$	$[-1.5, -0.2]$
θ_{f2}	$[-0.7, -0.4]$
$\dot{\theta}_{f2}$	$[-1.5, -0.2]$

بعد تحديد معاملات التحكم المختلفة ومجال تغيراتها، نحتاج لتعريفتابع الكلفة. يجب أن يضمنتابع الكلفة الحصول على حركة مستقرة للروبوت بسرعة مناسبة وبشكل مشابه لنمط الحركة عندالإنسان، لذلك نقوم بصياغة تابع الكلفة بالشكل التالي:

$$F = \frac{\text{Nb of Steps}}{1+e_1+e_2+e_3} \quad (4-5)$$

حيث: Nb of Steps هو عدد الخطوات التي يكملها الروبوت حتى سقوطه أو وصوله لعدد الخطوات الأعظمي المحدد.

$e_1 = a_1(v < v_0) \cdot |v - v_0|$ مقدار يهدف إلى جعل سرعة الروبوت تتجاوز حدّاً أصغرياً معيناً.

$e_2 = a_2 \cdot \text{div}(\theta_b)$ مقدار يهدف إلى جعل التغيرات الزاوية للجسم العلوي صغيرة قدر الإمكان أثناءالحركة.

$e_3 = a_3 \cdot \max \text{Clearance}$ مقدار يهدف إلى إلغاء اصطدام الرجل المتراجحة مع الأرض أثناء حركتها، ولم نجعل هذه الحالة حالة فشل للروبوت، وذلك بهدف تسهيل تقارب الخوارزمية من الحلول التي تعطي حركة مستقرة.

المعاملات a_i في المعادلات السابقة هي معاملات تنقيل تعطي لكل معامل أهمية خاصة بحسب مجال قيمه وبحسب أهميته بالنسبة للمصمم.

تم الوصول إلى الصيغة السابقة لتابع الكلفة بدراسة منطقية للمعاملات التي تحدد نمط حركة الروبوت وبناءً على بعض التجارب المبدئية على مسألة الأمثلة.

٤-٥ خاتمة

عرضنا في هذا الفصل خوارزمية التحكم بالروبوتات ثنائية الأرجل المعتمدة، تستعين هذه الخوارزمية بمولدات النمط المركزية لتوليد حركات دورية تتحكم بعزم ومرنة الروابط المرنة لنموذج روبوتي بست درجات حرارة مكون من سبعة أجسام. نموذج الخوارزمية المقترحة هو تبسيط لنموذج Huang، ف甫وضاً عن ارتباط نموذج التحكم بأطوار الحركة نستخدم النموذج ذاته لكل الأطوار مما يقلل من عدد المعاملات اللازمة لبناء النموذج ويمكن من استخدام الخوارزميات التطورية في إيجاد المعاملات والتي تعتمد عليها في الحصول على الأداء الأمثل وفق معايير الأمثلة المختلفة المشروحة في الفصول السابقة. قمنا بعد بناء خوارزمية التحكم بصياغة مسألة الأمثلة بهدف استخدامها لإيجاد المعاملات الأمثلية لخوارزمية التحكم فتم تحديد مجالات منطقية لغيرات المعاملات المختلفة، مع صياغة تابع الكلفة مناسب يضمن الوصول إلى حركة مستقرة لنموذج الروبوت المعتمد.

الفصل الخامس

النتائج العملية

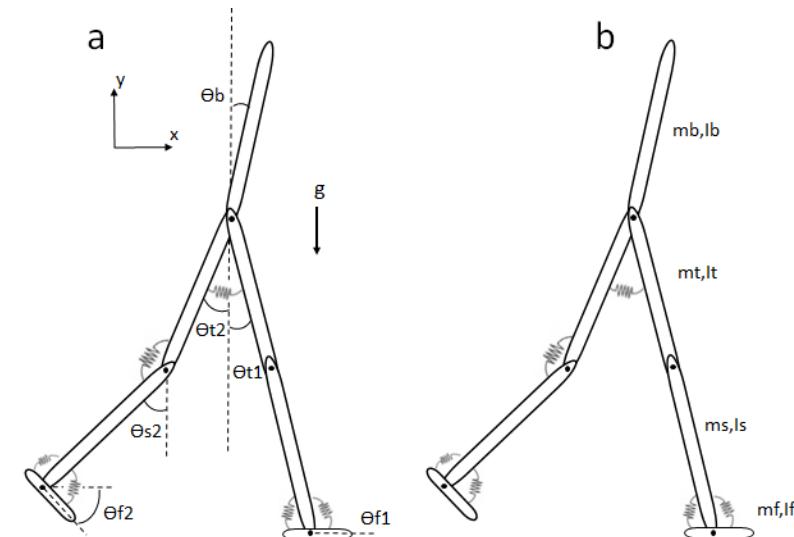
أنجزنا في الفصل السابق بناء خوارزمية تحكم بالروبوتات ثنائية الأرجل تعتمد على استخدام مولدات النمط المركزية للتحكم بعزم ومرنة مفاصل الحركة المختلفة لنموذج روبوتي مكون من سبعة أجسام. نعرض في هذا الفصل نتائج محاكاة خوارزمية التحكم، ومقارنة أدائها مع الخوارزميات المستخدمة في دراسات سابقة.

1-5 مقدمة

نعرض في هذا الفصل نتائج المحاكاة لتطبيق طريقة التحكم الثنائي – عزم المقترنة على النموذج الروبوتي المعتمد والمكون من سبعة أجسام. نقوم ببدايةً بتطبيق خوارزمية عناصر السرب بهدف إيجاد المعاملات الأمثلية، لنقوم بعد ذلك بمناقشة وتقدير الحل الناتج باستخدام معاملات أداء مختلفة تتضمن التنوع في أنماط الحركة وآلية الانتقال بينها إضافةً إلى الاستقرار المحلي والعام والصلادة ضد الاضطراب. وفي نهاية الفصل نعرض دراسة تبيّن أثر أمثلة معاملات التصميم الميكانيكي في تحسين الأداء بعد إضافة خوارزمية التحكم.

2-5 معاملات التصميم الميكانيكي المعتمدة

نعتمد بدايةً بهدف مقارنة أداء النموذج التحكمي المعتمد مع النموذج المقدم من قبل Huang [25] نفس المعاملات التصميمية التي اعتمدها Huang في دراسته. يبيّن الجدول 1-5 مجموعة القيم المعتمدة، أمّا دلالة الرموز فيوضّحها الشكل 1-5.



الشكل 1-5: النموذج بست درجات حرية. a) درجات الحرية. b) توزيع الكتل وعزوم العطالة.

نعتمد نفس سيناريوهات الروبوت غير المفعّل الموصفة في الفقرة 2-2-1 بالنسبة لسيناريوهات المشي، كما نعتبر اللحظة التي تلي مباشرةً رفع الرجل الخلفية عن الأرض هي لحظة بداية الحركة، وتتحدد حالة الروبوت في هذه اللحظة بسبعة متغيرات مستقلة وهي: زاوية الرجل الخلفية وسرعتها الزاوية ($\dot{\theta}_{l2}, \ddot{\theta}_{l2}$)، زاوية القدم الخلفية

وسرعتها الزاوية ($\dot{\theta}_{f2}$) ، السرعة الزاوية للرجل الأمامية $\dot{\theta}_b$ ووضع الجسم العلوي وسرعته الزاوية ($\dot{\theta}_b$)، ويمكن استنتاج بقية المتغيرات بالاعتماد على هذه المتغيرات المستقلة.

الجدول 5-1: معاملات التصميم المستخدمة وقيمها الإسمية.

Parameter	Description	Nominal Values
l	Leg length	0.8 m
l_t	Thigh length	0.4 m
l_s	Shank length	0.4 m
l_f	Foot length	0.2 m
l_b	Distance from center of mass (COM) of body to hip point	0.3 m
a_t	Relative distance from COM of thigh to hip point	0.5
a_s	Relative distance from COM of shank to knee joint	0.5
a_f	Relative distance from COM of foot to toe point	0.5
l_{ft}	Distance from ankle joint to toe point	0.14m
l_{fh}	Distance from ankle joint to heel point	0.06m
m_b	Upper body mass	12 kg
m_t	Thigh mass	2.5 kg
m_s	Shank mass	2.5 kg
m_f	Foot mass	1.2 kg
I_b	Body moment of inertia	0.36 kg.m²
I_t	Thigh moment of inertia	3.33x10⁻² kg.m²
I_s	Shank moment of inertia	3.33x10⁻² kg.m²
I_f	Foot moment of inertia	4.0x10⁻³ kg.m²

3-5 إيجاد المعاملات الأمثلية لخوارزمية التحكم

نستخدم لإيجاد معاملات النموذج التحكمي المقترن خوارزمية عناصر السرب الأمثلية المستخدمة في الفصل الثالث، مع اعتماد مجالات تغيرات المعاملات وتتابع الكلفة من الفصل السابق. يبيّن الجدول 5-2 معاملات خوارزمية عناصر السرب المختارة.

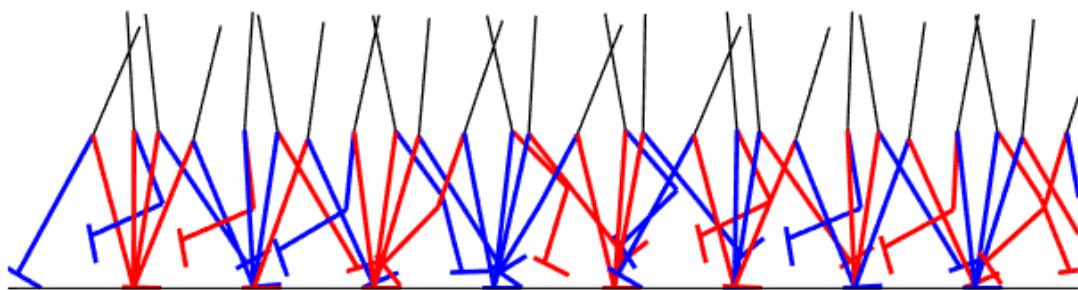
الجدول 5-2: معاملات خوارزمية عناصر السرب المستخدمة لإيجاد معاملات النموذج العصبي.

Parameter	Value
W	0.1
c1	1.49
c2	1.49
Min Neighbors Fraction	0.25
Crossover type	Stochastic
Encoding type	Real
Selection Strategy	Stochastic
Swarm Size	700

لا تضمن خوارزمية عناصر السرب كحال الخوارزميات التطورية الأخرى الوصول إلى الحل الشامل، كما أنّ طريقة تعريف تابع الكلفة في حالتنا يمكن أن يوصلنا إلى عدة حلول حسب طريقة الموازنة بين معاملات الأمثلة، للحلول التي يمكن أن نصل إليها.

بتطبيق خوارزمية عناصر السرب عدداً من المرات نصل إلى مجموعة من التشكيلات المختلفة من المعاملات وجميعها تؤدي إلى حركات مستقرة، ولكن هذه الحلول تتفاوت فيما بينها من حيث أنماط الحركة التي يمكن أن يبلغها الروبوت بتغيير إشارات الدخول (u_s, u_e, u_d)، ومن حيث الصلادة ضد الاضطراب والتي سندرسها بالتفصيل فيما بعد.

يبين الجدول 5-3 قيم المعاملات التي تعطي الحل الأفضل من بين مجموعة الحلول التي توصلنا إليها، ويبيّن الشكل 5-2 مخطط حركة الروبوت عند هذه القيم وانطلاقاً من مجموعة القيم التي تعطيها الخوارزمية لشعاع الحالة الابتدائية.

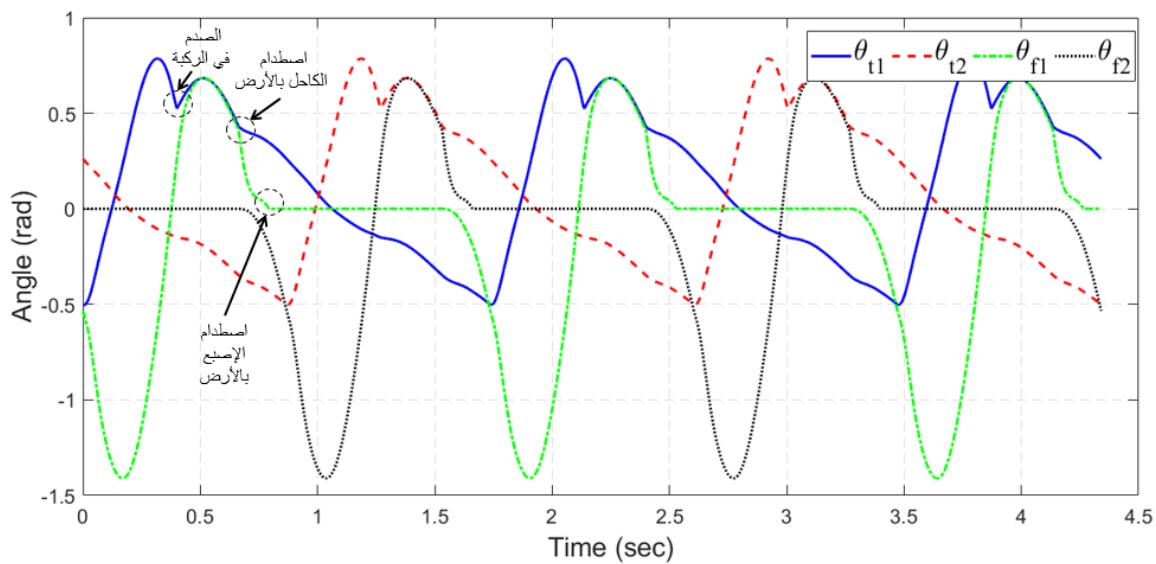


الشكل 5-2: مخطط حركة الروبوت من أجل المعاملات الأمثلية للنموذج التحكمي المقترن.

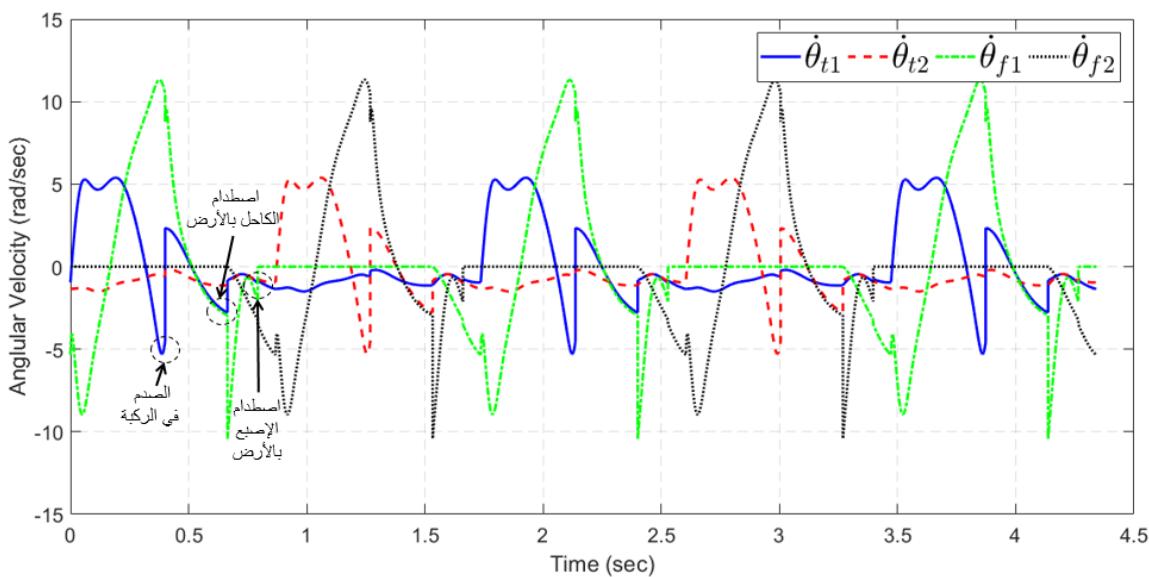
الجدول 5-3: المعاملات التصميمية الأُمُّلَّية المعتمدة للنموذج التحكمي المقترن.

Parameters	Optimized values
k_{s_hip}	67Nm.rad^{-1}
k_{s_knee}	6Nm.rad^{-1}
k_{s_feet}	34Nm.rad^{-1}
\tilde{u}^e	2.4
\tilde{u}^s	22
β^e, β^s	3.9, 1.3
$\tau_{hip}^e, \tau_{knee}^e, \tau_{feet}^e, \tau^s$	0.12, 0.4, 0.8, 0.66
$\omega_{12}^s, \omega_{21}^s, \omega_{41}^s, \omega_{52}^s$	-0.07, 0.32, -0.09, -0.34
$\omega_{12}^e, \omega_{21}^e, \omega_{32}^e, \omega_{41}^e, \omega_{52}^e$	-3.9, 1.4, 1.4, 1.4, 0.28
$c_1^e, c_2^e, c_3^e, c_4^e, c_5^e$	0.97, 1, 0.28, 0.24, -0.16
c_1^s, c_2^s	0.94, 0.55
$g_{ep}^{hip}, g_{ep}^{knee}, g_{ep}^{foot}, g_{ed}^{hip}, g_{ed}^{knee}, g_{ed}^{foot}$	-0.8, 0, 0, 0.7, -0.8, 0.2
$g_{sp}^{hip}, g_{sp}^{foot}, g_{sd}^{hip}, g_{sd}^{foot}$	72.6, -66, 57, 5
θ_{t2}	-0.419
$\dot{\theta}_{t2}$	-1.5
$\dot{\theta}_{t1}$	-1.6
θ_{f2}	-0.45
$\dot{\theta}_{f2}$	-1.6

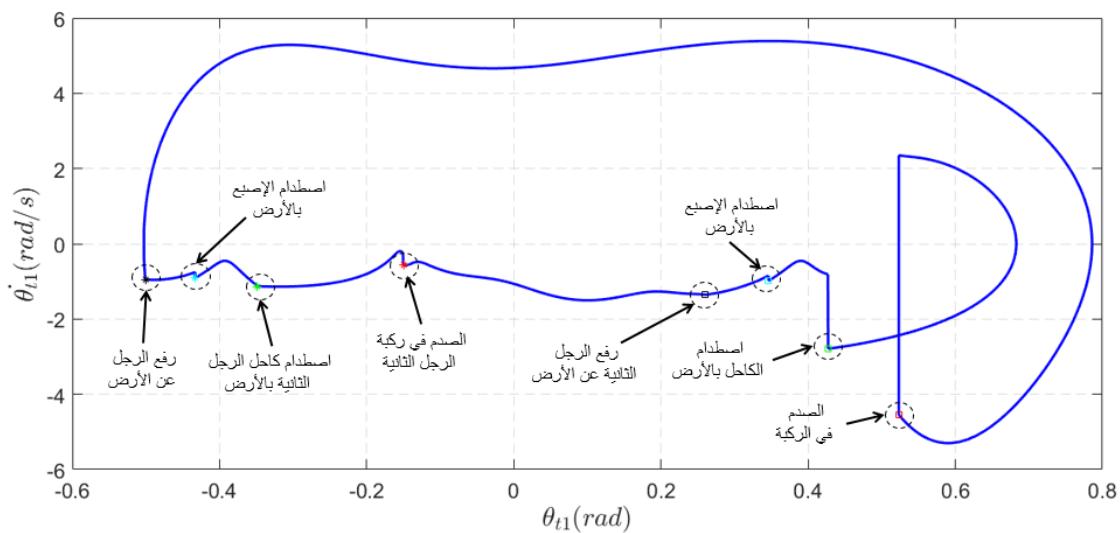
يبين الشكل 5-3 تغيير زاوية كل من الرجلين الساكنة والمتأرجحة والقدمين الموافقتين خلال إطار الحركة المختلفة من أجل خمس خطوات متتالية، ونلاحظ فيه تساوي زاوية القدم مع الفخذ في طور التأرجح مع الركبة مغلقة للرجل الموافقة، لكوننا فرضنا هذا الشرط عند تنजيز الخوارزمية كما ذكرنا سابقاً، مع انعدام زاوية القدم في حالة الرجل الساكنة، ويبيّن الشكل 5-4 السرع الزاوية الموافقة ويظهر فيه بوضوح أثر الصدم في الركبة ومع الأرض بشكل عدم استمرارية في منحني السرع. يعرض الشكل 5-5 مسقط الحلقة الحدية في المستوى المعروف بزاوية الرجل الأولى وسرعتها الزاوية، تتكرر هذه الحلقة الحدية مع تالي الخطوات حيث يعود الروبوت في نهاية كل خطوة إلى الوضع الابتدائي له المحدد بلحظة ارتفاع الرجل الخلفية عن الأرض في نهاية طور الدفع بالقدم الخلفية.



الشكل 5-3: تغير زوايا رجلي الروبوت وقدميه خلال خمس خطوات متتالية.



الشكل 5-4: السرع الزاوية لرجل الروبوت والقدمين خلال خمس خطوات متتالية.



الشكل 5-5: مسقط الحلقة الحدية للروبوت في المستوى المعروف بزاوية الرجل الأولى وسرعتها، يظهر الشكل النقاط الأساسية من مراحل الحركة.

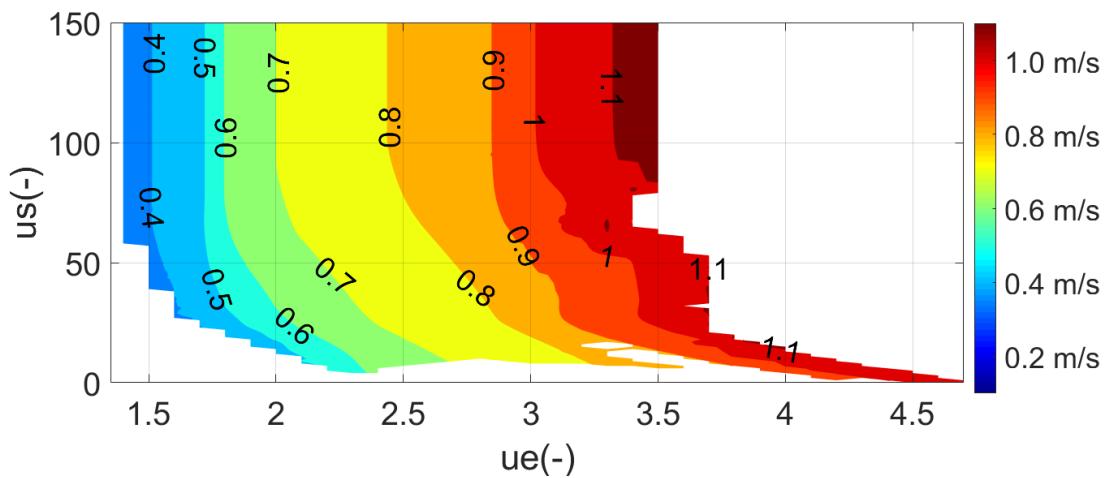
4-5 دراسة النتائج

ندرس فيما يلي أداء الخوارزمية المقترحة من حيث أنماط الحركة التي يمكن الوصول إليها بتغيير إشارات الدخل وآلية الانتقال بينها، إضافةً إلى الاستقرار المحلي والعام والصادرة ضد الاضطراب. في النهاية نقدم دراسة تجريبية تبيّن أثر أمثلة معاملات التصميم الميكانيكي في تحسين الأداء بعد إضافة خوارزمية التحكم.

1-4-5 أنماط الحركة

انطلاقاً من قيم المعاملات التي تم التوصل إليها في الفقرة السابقة وبتغيير إشارات التحكم بالنموذج (u_s, u_e)، ندرس الحركات التي يمكن للروبوت أداؤها.

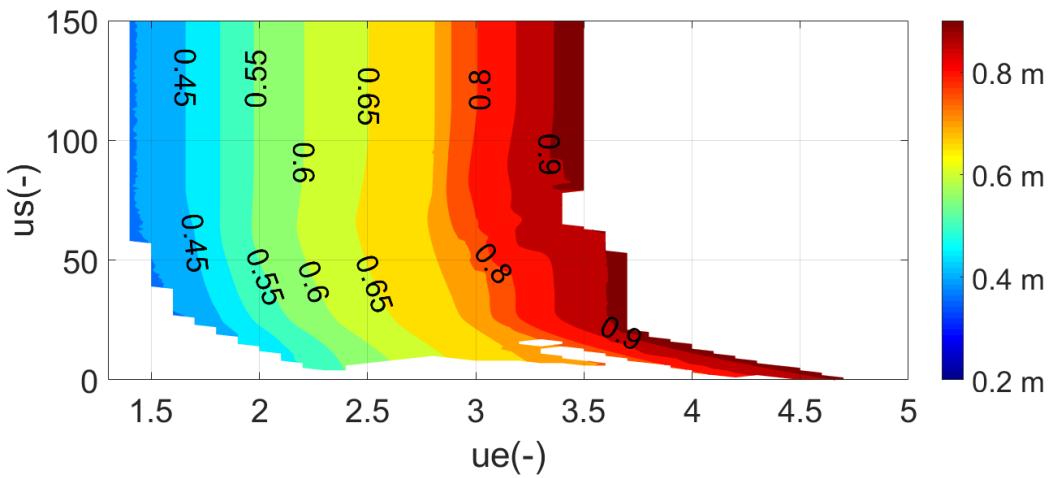
يبيّن الشكل 5-6 مجال السرعات الذي يمكن للروبوت بلوغه وفق مجموعة القيم الممكنة لإشارات الدخل، ونلاحظ من الشكل زيادة السرعة بزيادة قيم معاملي الدخل ونعمل ذلك بزيادة الطاقة المدخلة للنظام، ويتراوح مجال السرعات الممكن بلوغها ضمن المجال $[0.34, 1.2] \text{ m.s}^{-1}$ وهذا يوافق رقم Froude ضمن المجال [25] Huang [0.12, 0.43] ونلاحظ أنّ هذا المجال قريب من المجال الذي أعطاه نموذج [0.15, 0.43] ضمن المجال ويتقدّم عليه في الحد الأدنى لسرعة الحركة الممكن بلوغه.



الشكل 5-6: مجال سرعات الحركة بتغيير إشارتي التحكم (u_e, u_s) .

لا تؤدي الزيادة في قيمة المعامل u عن الحد المبين بالشكل 5-6 إلى سقوط الروبوت ولكن التغيير الأعظمي للقيم الممكنة لتغير المرونة المحدد بالمجال $[10,10] Nm.rad^{-1}$ يحد من قدرة المرونة على تغيير سرعة الحركة من أجل القيم الأكبر لإشارة الدخل u_s .

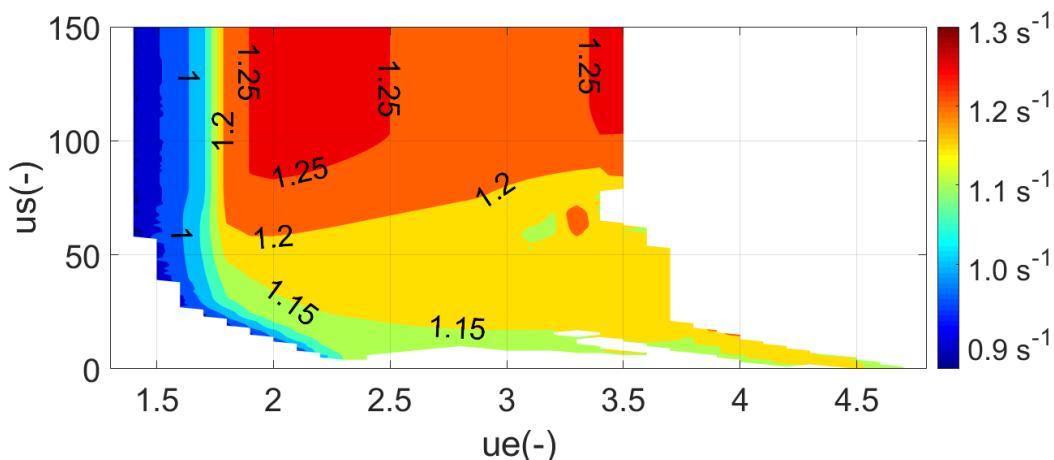
تبين خطوط تساوي السرعة في الشكل 5-6 أنه يمكن الوصول إلى نفس السرعات من أجل قيم مختلفة لإشارات الدخل، ويكون الاختلاف بين هذه الحركات بالسرعات المتزايدة في طول الخطوة وتردد الحركة، وهذا ما يبيّنه الشكلان 5-7 و5-8.



الشكل 5-7: تغيير طول الخطوة بتغيير إشارتي التحكم (u_e, u_s) .

نلاحظ من الشكل 5-7 أن طول الخطوة يزداد بشكل أساسى بزيادة إشارة الدخل u_e دون أن يكون مستقلاً بشكل كامل عن الدخل u_s وخصوصاً في حالة القيم الصغيرة لهذه الإشارة، وهذا يدل أن هذه الإشارة مسؤولة بشكل أساسى عن زيادة طول الخطوة.

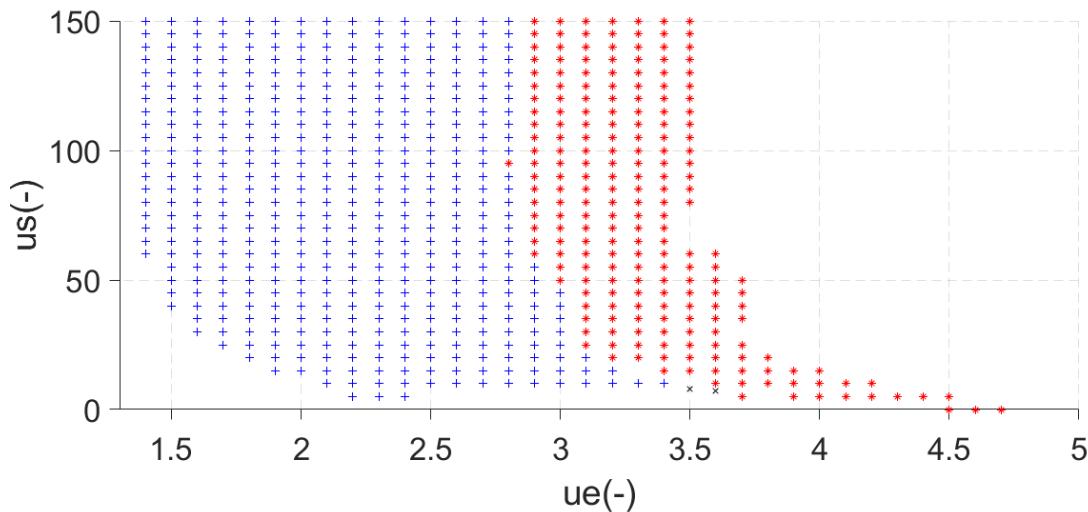
بالمقابل يبيّن الشكل 5-8 الممثل لتأثير تردد الحركة أن التردد يرتبط بشكل أساسى بإشارة الدخل u_s بعد زيادة إشارة الدخل u_e عن حد معين، دون أن يكون مستقلاً بشكل كامل عن هذه الإشارة.



الشكل 5-8: تغير تردد الحركة بتغيير إشارتي التحكم (u_e, u_s) .

يبيّن الشكل 5-9 نمط الحركات التي يؤديها الروبوت ضمن مجال إشارات التحكم الممكنة، ونلاحظ من الشكل أنه، ومن أجل القيم الكبيرة لإشارتي الدخل، نحصل على حركة من النمط 3-gait أي أنه يحصل حالة رفع مبكر لقدم الرجل الخلفية عن الأرض قبل اصطدام الرجل الأمامية مع الأرض وهذه النتيجة منطقية وذلك لكون الطاقة المدخلة للنظام تكون كبيرة في هذه الحالة مما يمكن من رفع الرجل الخلفية بشكل مبكر ويساهم ذلك في زيادة سرعة حركة النموذج الروبوتي، كما نلاحظ من الشكل غياب الحركات من النمط الأول 1-gait من مجال الحركات الممكن (الفقرة 2-2)، ونفسه ذلك بأننا فرضنا على الروبوت مجال تغير كبير نسبياً للمرنة مما يساعده في رفع القدم الخلفية عن الأرض قبل اصطدام القدم المتقدمة بشكل كامل مع الأرض، وذلك خلافاً للنموذج المقدم من قبل Huang [25] والذي نلاحظ فيه ظهور هذا النمط من الحركات. لكن ولما كانت هذه الحركات ذات أداء طاغي واستقرار منخفضين [42]، كما أن نمطي الحركة التي يعطيهما النموذج هما النمطان الأكثر ظهوراً في حركات البشر [42] لذلك لا نهتم بها كثيراً في حالتنا.

إضافةً إلى الحركات من النمط الثاني والثالث نلاحظ ظهور بعض النقاط التي تعطي مزيجاً من الحركتين وهنا تكون الحركة دورية ولكن دور لا يساوي الواحد وتناوب الحركة بين النمطين السابقين.

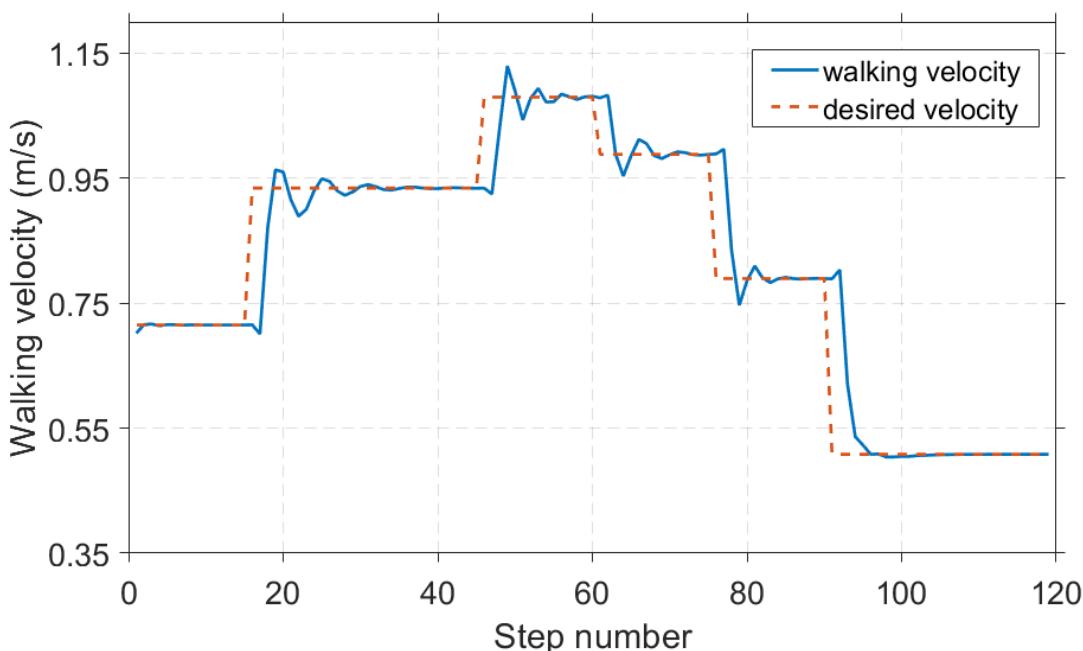


الشكل 5-5: أنماط المشي كتابع لإشارتي الدخل (u_e, u_s) : (+): الحركات من النمط الثاني gait2، (*): الحركات من النمط الثالث gait3، (x): مزيج من الحركات من النمط الثاني والثالث.

4-2 التحكم بسرعة الحركة

ندرس فيما يلي قدرة الروبوت على الانتقال بين حركات بمواصفات مختلفة أثناء سير الروبوت. يتم التحكم بمواصفات الحركة في الحلقة المفتوحة واعتماداً على الاستكشاف المسبق لقدرات الروبوت على الحركة ضمن مجال القيم الممكنة لإشارات الدخل (u_e, u_s) .

يبين الشكل 5-10 ملائمة الروبوت لبروفيل محدد مسبقاً للسرعة. يتم تغيير السرعة بتغيير مطال إشارتي الدخل في اللحظة التي يبدأ فيها طور الدفع نحو الأعلى، ونلاحظ من الشكل المرونة وإمكانية الانتقال المباشر بين قيم السرعة المختلفة أثناء الحركة، ونلاحظ أن التجاوز لا يزيد عن 5% من أجل جميع قيم الانتقال، وأن عملية الانتقال تتم خلال ثلالث إلى أربع خطوات.



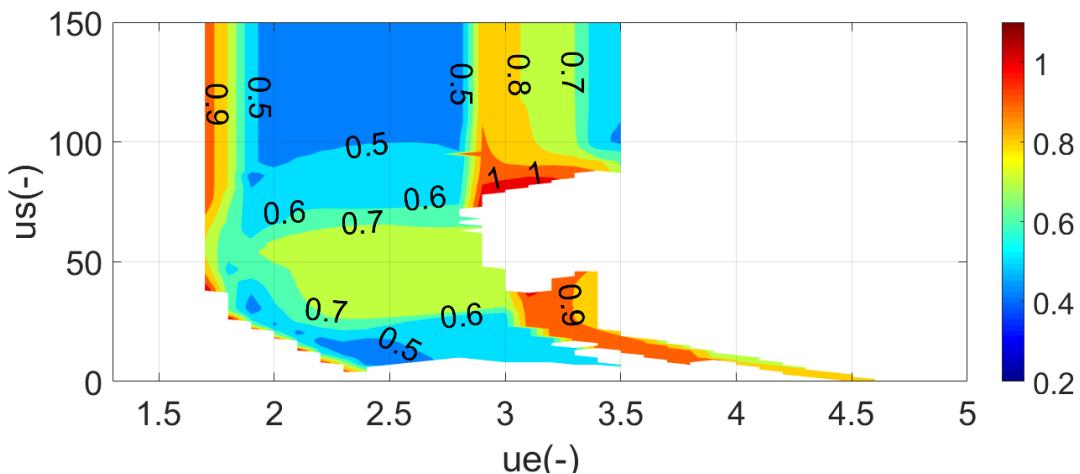
الشكل 5-10: ملاحقة النموذج الروبوتي لبروفيل محدد للسرعة.

لا يمكن في جميع الحالات الانتقال المباشر بين جميع القيم في فضاء العمل، بل يمكن أن تؤدي بعض الانتقالات إلى سقوط النموذج الروبوتي، ونعلم ذلك أن نقطة العمل التي يمر فيها الروبوت قبل تطبيق التغيير لا تقع ضمن منطقة الجذب لنقطة العمل المراد الوصول إليها، ولذلك فالانتقال يتطلب المرور ب نقطة وسیطة واقعة في منطقتي الجذب لكلا النقطتين السابقة والتالية.

3-4 دراسة الاستقرار المحلي

ندرس الاستقرار المحلي للروبوت بالاعتماد على القيم الذاتية لمصفوفة اليعقوبي لتابع الخطوة، ونهتم فقط بالحركات الدورية من النمط الأول 1-period walking motion .

يبين الشكل 5-11 معاملات التحكم التي تكون فيها قيم طولية القيم الذاتية العظمى لمصفوفة اليعقوبي أصغر من الواحد ونلاحظ من الشكل أنّ معظم الحركات مستقرة محلياً.

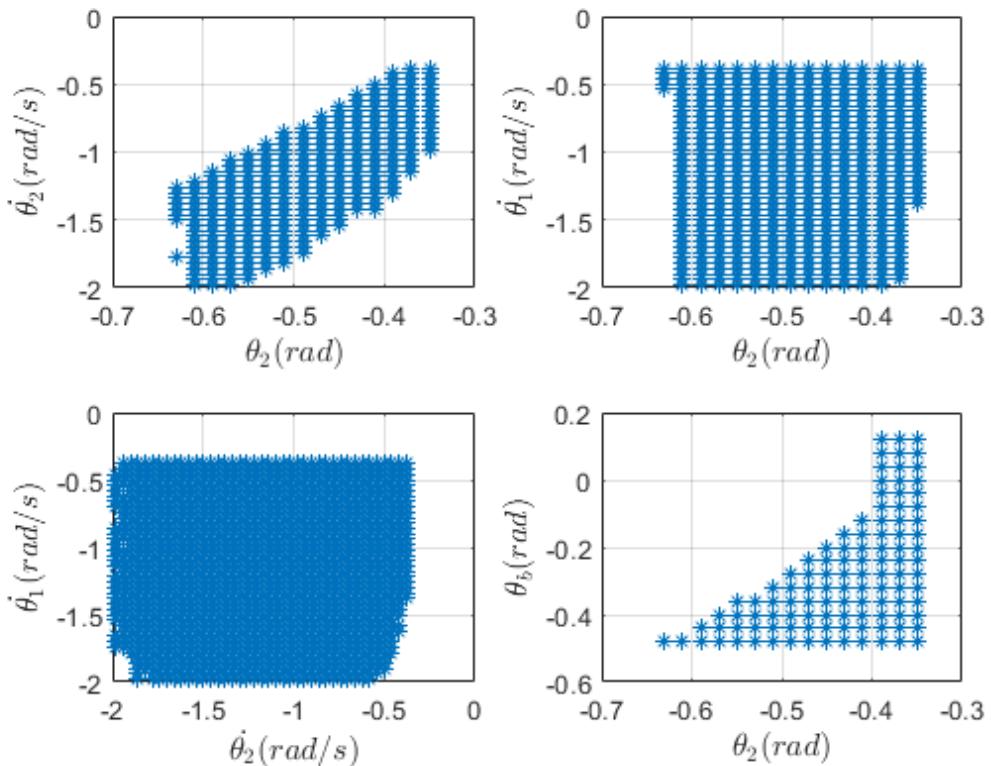


الشكل 5-11: تغير طولية القيمة الذاتية العظمى لمصفوفة اليعقوبى لتابع الخطوة بتغيير إشارتي الدخل (u_e, u_s) .

4-4-4 دراسة الاستقرار العام

يتحدد الاستقرار العام للروبوت ثنائي الأرجل بدراسة منطقة الجذب BoA والتي تحديد مجموعة القيم الابتدائية لتابع الخطوة التي يمكن الانطلاق منها والوصول إلى حركة مستقرة. كما ذكرنا سابقاً تعتبر نقطة البداية هي النقطة التي تلي رفع الرجل الخلفية عن الأرض مباشرةً، يتحدد شعاع الحالة الابتدائية للروبوت في هذه الحالة بسبعة متحولات مستقلة، وبالتالي لدراسة منطقة الجذب يجب دراسة فضاء بسبعة أبعاد مستقلة وهو أمر مكلف جداً حسابياً. لذلك وبهدف تبسيط الدراسة ندرس فقط الحالات الابتدائية التي تكون فيها السرعة الزاوية للجسم العلوي معروفة، وزاوية القدم الخلفية وسرعتها الزاوية متساوية لزاوية الرجل الخلفية وسرعتها الزاوية على الترتيب. وبالتالي ينخفض عدد المعاملات المستقلة إلى أربعة معاملات فقط وهي زاوية الرجل الخلفية وسرعتها الزاوية والسرعة الزاوية للرجل الأمامي وزاوية الجسم العلوي ($\theta_b, \dot{\theta}_b, \theta_{l2}, \dot{\theta}_{l2}$) .

ندرس منطقة الجذب للمتحولات الأربع المتبقية باستخدام خوارزمية Cell Mapping، حيث يبيّن الشكل 5-12 منطقة الجذب من أجل إشارتي الدخل $u_e = 2.4, u_s = 22$ ، ويمكن أن نشاهد بوضوح أن منطقة الجذب واسعة مما يثبت كفاءة النموذج المطروح من ناحية ضمان الاستقرار العام للروبوت.



الشكل 5-12: منطقة الجذب للروبوت من أجل إشارتي الدخل $u_e = 2.4, u_s = 22$

5-4-5 دراسة صلادة النموذج ضد الاضطراب

ندرس في هذه الفقرة صلادة النموذج ضد اضطراب على شكل تغيرات في استوائية الأرض التي يتحرك عليها الروبوت. حيث نقوم بتمويل مسار بطول خمسين خطوة وبتغيرات عشوائية في ارتفاع الأرض ضمن المجال $[e/2, -e/2]$ في كل خطوة. نعيد الإجرائية مئة مرة ونحسب نسبة نجاح الروبوت في اجتياز المسار المولّد حيث يبيّن الشكل 5-13 نسبة نجاح الروبوت بتجاوز الاضطرابات العشوائية كتابع للطويلة الأعظمية لهذه الاضطرابات e ، ونلاحظ من الشكل أنّ الروبوت يتمكّن من تجاوز مسار بتغيرات عشوائية بطولية عظمى $e=6\text{mm}$ بنسبة نجاح حوالي 40%.

بهدف زيادة صلادة النموذج ضد هذا النمط من الاضطراب نقوم بإضافة مدخلات تحكم إضافية للنظام ترتبط بالاضطراب الذي يتعرض له الروبوت أثناء حركته، حيث نضيف هذه المدخلات إلى إشارات التحكم الأساسية خلال أطوار مختلفة من أطوار الحركة وإلى عدد من المفعلات فقط كالتالي:

- مفعلات الرجل المستقرة خلال طوري التأرجح.

- مفعّلات القدم الخلفية في طور الدفع نحو الأعلى.
- مفعّلات رابطتي الخصر خلال طوري التأرجح.

إن اختيار المفعّلات وأطوار الحركة التي نضيّف فيها هذه الإشارات مستوحى من تصرّف الإنسان عند مواجهته لانخفاض مفاجئ في ارتفاع الأرض أثناء الحركة، وبناءً على عدّة تجارب مبدئية قمنا بها بهدف اختيار الإشارات الأنسب.

يتم إضافة الإشارات السابقة في الخطوة التي تلي تحسّس الروبوت للانخفاض في استوائية الأرض، حيث يتم قياس مقدار الانخفاض بالاعتماد على الفرق في ارتفاع رجلي الروبوت e ، وإضافته وفق الاستراتيجيّة السابقة الذكر بالشكل التالي:

$$\begin{aligned} u_{ee}^i &= u_e^i + c_{ee}^i e \\ u_{se}^i &= u_s^i + c_{se}^i e \end{aligned} \quad (5-1)$$

حيث: i رقم الرابطة، c_{ee}^i, c_{se}^i أوزان الوصلات المضافة، u_e, u_s إشارات التحكم الإسمية، e تقادس بالمتر.

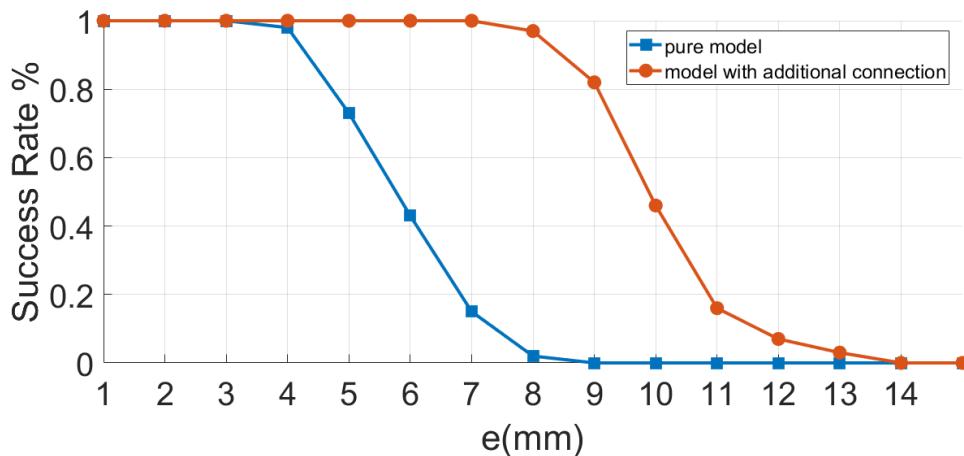
لحساب المتحولات c_{ee}^i, c_{se}^i نستعين مرة أخرى بخوارزمية عناصر السرب ونوجد قيم المعاملات التي تعطي الأداء الأفضل ونوصّف الأداء الأفضل في هذه الحالة بالعدد الوسطي للخطوات التي ينجح الروبوت في قطعها من أجل تغييرات في استوائية الأرض ضمن المجال $[10,10] mm$ من أجل عشر محاولات. يبيّن الجدول 5-4 قيم معاملات خوارزمية عناصر السرب المستخدمة، ويبين الجدول 5-5 القيم الأمثلية لهذه المعاملات التي حصلنا عليها، كما يبيّن الشكل 5-13 القيم العظمى للاضطراب الممكن تجاوزه، ونلاحظ أثر هذه الاستراتيجيّة في تحسين الأداء بالمقارنة مع أداء الروبوت قبل تطبيقها، حيث ازدادت الصلادة بنسبة 60%.

الجدول 5-4: معاملات خوارزمية عناصر السرب المستخدمة لإيجاد معاملات الصلادة ضد الاضطراب.

Parameter	Value
W	0.1
c1	1.49
c2	1.49
Min Neighbors Fraction	0.25
Crossover type	Stochastic
Encoding type	Real
Selection Strategy	Stochastic
Swarm Size	150

الجدول 5-5: القيم الأمثلية لمعاملات الصلادة ضد الاضطراب.

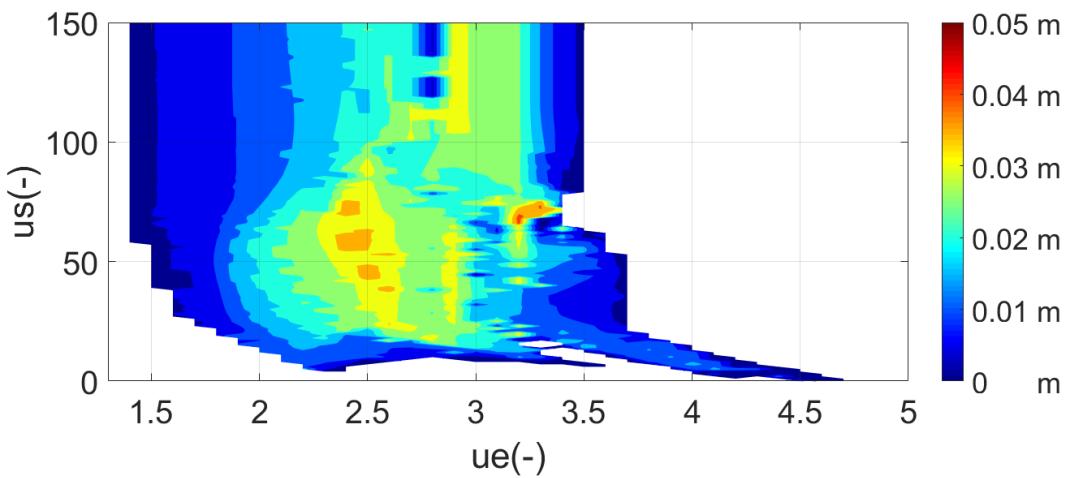
Parameter	Value
c_{ee}^1	-20.46
c_{ee}^2	-2.13
c_{ee}^4	-23.52
c_{ee}^5	-12.48
c_{ss}^1	-476
c_{ss}^2	9.1x103
c_{ss}^4	-3.4x103
c_{ss}^5	5.6x103



الشكل 5-13: نسبة نجاح الروبوت في تجاوز مسار باضطراب عشوائي بطوله e مع وبدون الاستراتيجية المقترنة لزيادة الصلادة ضد الاضطراب.

ندرس إضافةً إلى ما سبق مقدار الانخفاض الأعظمي في ارتفاع الأرض الذي يمكن للروبوت تجاوزه لخطوة واحدة مع الوصلات المضافة ومع تغيير إشارتي الدخل (u_e, u_s). يبيّن الشكل 5-14 نتيجة الدراسة، حيث تبيّن أعظم تغير في الارتفاع يمكن أن يتجاوزه الروبوت هو 0.048m من أجل إشارتي الدخل

$$u_e = 3.1, u_s = 67$$



الشكل 5-14: الانخفاض الأعظمي في استوائية الأرض الذي يمكن للروبوت تجاوزه مع تغير إشارتي التحكم (u_e, u_s) بعد تطبيق استراتيجية التحكم المقترنة.

6-4-5 دراسة الأداء الطاقي

كما ذكرنا سابقاً تقادس الكفاءة الطاقيّة في حالة الروبوتات ثنائية الأرجل بالطاقة المستهلكة من قبل الروبوت للانتقال مسافة محددة، وبغية المقارنة بين أداء الروبوتات المختلفة يتم تقسيم هذه القيمة على وزن الروبوت مضروباً بالمسافة المقطوعة [25]:

$$C_t = \frac{\text{Used energy}}{\text{weight} \cdot \text{distance travelled}} \quad (3.11)$$

يمكن تحديد الطاقة المستهلكة بعدة طرق، حيث تميّز بين الطاقة الكلية المصاروفة من قبل الروبوت أو الطاقة المصاروفة لأداء العمل الميكانيكي فقط. نذكر في دراستنا على الطاقة المصاروفة لأداء العمل الميكانيكي فقط والتي تسمى الكلفة الميكانيكية للحركة mechanical cost of transport c_{mt} . يعرّف العمل الميكانيكي في كل رابطة من الروابط بأنه تكامل الاستطاعة الميكانيكية خلال الزمن، حيث تعطى الاستطاعة الميكانيكية بجداء عزم الرابطة τ بسرعتها الزاوية $\dot{\theta}$. يمكن أن تكون الاستطاعة الميكانيكية موجبة (إضافة طاقة إلى الحركة) أو سالبة (امتصاص طاقة الحركة). نفرض في حالتنا أن كلا الطاقتين الموجبة والسلبية يتم توليدهما بواسطة محرك، ولذلك نعتمد القيمة المطلقة للاستطاعة الميكانيكية لتحديد العمل الميكانيكي المستهلك خلال خطوة واحدة بزمن T :

$$W_{total} = \int_0^T |\tau \cdot \dot{\theta}|$$

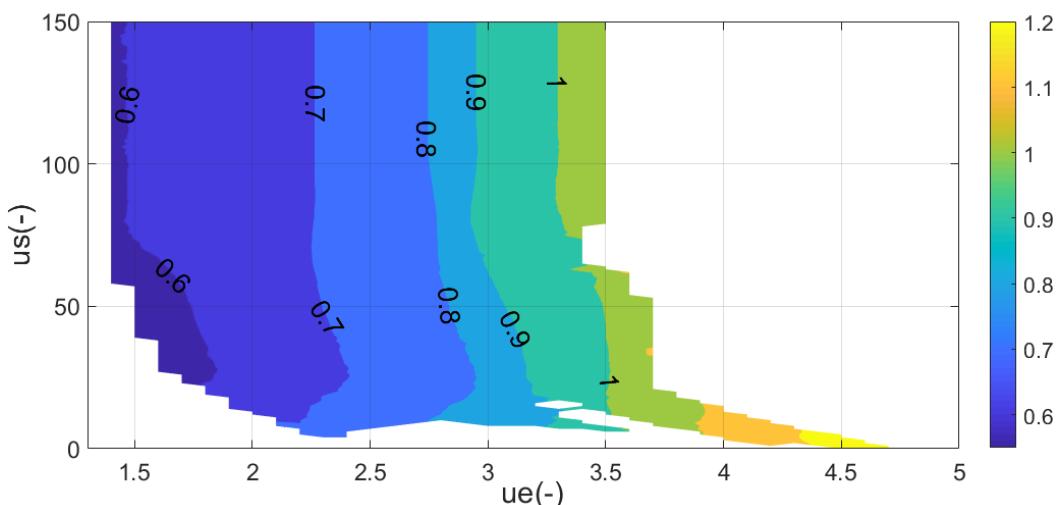
وبالتالي تعطى الكلفة الميكانيكية للحركة بالعلاقة:

$$c_{mt} = \frac{\sum_{\text{all joint}} W_{total}}{m.g.d_{step}}$$

حيث: d_{step} هي المسافة المقطوعة خلال خطوة واحدة.

يبيّن الشكل 5-15 الكلفة الميكانيكية للحركة كتابع لمعاملات التحكم المختلفة. بمقارنة هذه الكلفة مع الكلفة الميكانيكية المستهلكة من قبل نموذج Huang من أجل نفس السرع المعرفة برقم Froude، نلاحظ أنّ نموذجنا يستهلك طاقة أكبر من تلك المستهلكة من قبل نموذج Huang ويمكن أن نرجع ذلك لأنّ في نموذج Huang قد تم فرض قيود ديناميكية على حركة الجسم العلوي بحيث يبقى محافظاً على وضعية وسطية بين الرجلين أثناء حركته، وهذه القيود تخفض كثيراً من الطاقة المستهلكة.

كما نستنتج من الشكل 5-15 أنّ الكلفة الميكانيكية تزداد بشكل أساسي بزيادة قيمة إشارة الدخل u_e ، وهذا يدل على أنّ زيادة السرعة بزيادة الدخل u_s يكون أوفر طاقتياً من العمل على زيتها بزيادة الدخل u_e المرتبط بزيادة العزم المطبق، وهذه النتيجة تتفق مع النتيجة التي توصل إليها Huang في دراسته.



الشكل 5-15: الكلفة الميكانيكية للحركة كتابع لإشارتي الدخل (u_e, u_s) .

7-4-5 دراسة أثر معاملات التصميم الميكانيكي على الأداء بعد إضافة خوارزمية التحكم

حاولنا بدايةً تطبيق نتائج عملية أمثلة النموذج غير المفعّل على النموذج بعد إضافة خوارزمية التحكم، ولكننا لم ننجح في الوصول إلى تحسين في الأداء، ويمكن أن نرجع ذلك إلى أن إضافة النموذج العصبي والتحكم في مرونة التوابع المكونة للنموذج المعتمد يساهم في تعديل الديناميكي الداخلي للروبوت وبالتالي نستنتج أن عملية الأمثلة لمعاملات التصميم الميكانيكي يجب أن تتم بعد إضافة خوارزمية التحكم المعتمدة، وهنا قد نواجه مشكلة أنه وعند كل تعديل في إشارات الدخل يتم تعديل ديناميكي الحركة وبالتالي قد يختلف تأثير المعاملات المختارة من نقطة إلى نقطة أخرى. ولذلك سندرس في هذه الفقرة عملية الأمثلة عند نقطة عمل إسمية للنموذج الروبوتي مع النموذج العصبي المعتمد، وندرس تأثير أمثلة الأداء عند هذه النقطة من أجل كامل مجال العمل المعروف بإشارات التحكم بالنماذج.

نقوم ببناء إجرائية الأمثلة بشكل مشابه لعملية الأمثلة عند نقطة عمل إسمية في الفصل الثالث، وكما لاحظنا سابقاً فإن تنوع السرع والاستقرار المحلي والصلادة ضد الضجيج بعد إضافة خوارزمية التحكم جيدة ولذلك سنكتفي في هذه الفقرة بدراسة أمثلة الأداء الطاقي عند نقطة العمل الإسمية، مع الإشارة إلى أنه يمكن توسيع الدراسة من أجل أي معاملات من معاملات الأداء الموصقة للنموذج.

نعتمد نقطة العمل الإسمية المعروفة بالمقدارين (نقطة وسطية ضمن مجال عمل الروبوت):

$$Fr_0 = 0.286, d_0 = 0.654$$

حيث: d_0, Fr_0 هما رقم فرود وطول الخطوة على الترتيب. يمكن الوصول إلى هذه القيم من أجل إشارتي الدخل $u_e = 2.5, u_s = 75$ ، وتكون الكلفة الطاقية الميكانيكية في هذه الحالة:

$$c_{mt} = 0.743$$

نعرف تابع الكلفة في هذه الحالة بالشكل التالي:

$$C = \frac{\omega_1}{1 + 10 \times |Fr - Fr_0|} + \frac{\omega_2}{1 + 10 \times |d - d_0|} + \times \frac{\omega_3}{1 + 20 \times c_{mt}} \quad (3.21)$$

نختار معاملات التوزين كالتالي:

$$\omega_1 = 0.45, \omega_2 = 0.45, \omega_3 = 0.10$$

حيث اخترنا قيم كبيرة لمعاملات التوزين الخاصة بطول الخطوة ورقم فرود لضمان الوصول إلى نفس نقطة العمل الإسمية عند إشارات الدخل المعتمدة ذاتها، كما تم تحديد بقية معاملات تابع الكلفة عن طريق التجربة للوصول إلى النتيجة الأفضل.

وبتطبيق إجرائية الأمثلة باستخدام خوارزمية عناصر السرب، نحصل على معاملات التصميم الميكانيكية المبنية في الجدول 5-6، وتكون الكلفة الطاقية من أجل هذه القيم مساوية لـ $c_{mt} = 0.697$. بالنتيجة أسهمت إعادة توزيع الكتل والأطوال بشكل أمثل في خفض استهلاك الطاقة عند نقطة العمل المعتمدة بنسبة 6.2%.

كما درسنا تأثير أمثلة المعاملات التصميمية على كامل مجال العمل المعروف بإشارات الدخل (u_e, u_s)، حيث دلت دراسة النتائج أن أمثلة المعاملات التصميمية ساهمت في زيادة الأداء الطاقوي على كامل مجال العمل، ولكنها بالمقابل خفضت مجال السرع الممكن بلوغه بتغيير إشارات الدخل ليصبح ضمن المجال m_s^{-1} [0.34, 1.01]، ولكن الحركات التي حصلنا عليها بأغلبها حركات دورية بدور وحيد وباستقرار محلي جيد على كامل مجال العمل.

8-4-5 مناقشة النتائج

أعطى النموذج المقترن نتائج جيدة اعتماداً على معاملات الأداء المختلفة، حيث يتراوح رقم Froude الناتج ضمن المجال 0.12 حتى 0.43، وهذه النتائج قريبة من النتائج التي حصل عليها Huang والتي تتراوح بين 0.14 حتى 0.43 [25]، ويمكن مقارنة هذه النتائج مع دراسات سابقة (مثلاً رقم فرود للروبوت Veronica يترواح ضمن المجال [0.07, 0.16] [24]، وللروبوت Runbot ضمن المجال [0.25, 0.50] [66]). كما ممكن النموذج التحكمي المطبق إضافياً إلى مجال السرع الواسع، من الانتقال بين أنماط مختلفة للحركة بعدد قليل من الخطوات (ثلاث إلى أربع خطوات) مع قيمة في التجاوز قبل الوصول إلى الاستقرار لا تتجاوز 5%.

نهايةً، ساعدت استراتيجية زيادة الصالدة ضد الاضطراب المقترن - والتي تقوم على إضافة وصلات جديدة تعمل فقط عند تغيير استوائية الأرض التي يتحرك عليها الروبوت - على زيادة قدرة الروبوت على الحركة على الأرض الوعرة وأصبح بإمكان الروبوت تجاوز تشوهات بمطالات أعظمية تصل حتى 20mm بنسبة نجاح

50%. يمكن النظر إلى هذه الوصلات المضافة كطبقة ثانية تضاف إلى النموذج العصبي التحكمي الأساسي، كما يمكن العمل على هذه الفكرة من أجل أنماط الاضطراب المختلفة، بحيث تبقى الطبقة الأساسية هي المسؤولة عن الحركة و تعمل الطبقات المساعدة الأخرى المضافة في الحالات الخاصة فقط.

الجدول 5-6: معاملات التصميم الأمثلية.

Parameter	Description	Nominal Values	Optimized Values
l	Leg length	0.8 m	0.8 m
l_t	Thigh length	0.4 m	0.37 m
l_s	Shank length	0.4 m	0.43 m
l_f	Foot length	0.2 m	0.17 m
l_b	Distance from center of mass (COM) of body to hip point	0.3 m	0.31 m
a_t	Relative distance from COM of thigh to hip point	0.5	0.588
a_s	Relative distance from COM of shank to knee joint	0.5	0.686
a_f	Relative distance from COM of foot to toe point	0.5	0.5
l_{ft}	Distance from ankle joint to toe point	0.14 m	0.09 m
l_{fh}	Distance from ankle joint to heel point	0.06 m	0.08 m
m_b	Upper body mass	12 kg	11.67 kg
m_t	Thigh mass	2.5 kg	2.51 kg
m_s	Shank mass	2.5 kg	1.67 kg
m_f	Foot mass	1.2 kg	0.59 kg
I_b	Body moment of inertia	0.36 kg.m^2	0.36 kg.m^2
I_t	Thigh moment of inertia	$3.33 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$	$3.33 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$
I_s	Shank moment of inertia	$3.33 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$	$3.33 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$
I_f	Foot moment of inertia	$4.0 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$	$4.0 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$

يمكن للروبوت مع النموذج التحكمي العصبي المقترن أن يتجاوز انخفاضاً مفاجئاً في ارتفاع الأرض بخطوة تصل إلى 4.8cm أي حوالي 6% من طول الرجل الكلي للروبوت. هذه القيمة تعتبر جيدة جداً مقارنة مع غيرها من القيم في الدراسات المختلفة (نموذج Huang قادر على تجاوز اضطرابات بخطوة تصل إلى

5.25% من طول الرجل الكلي [25]، الروبوت Meta يمكنه تجاوز اضطرابات تصل حتى 5% من طول رجله باستراتيجية تحكم تدمج بين التحكم المحلي بالكاحل المستقر إضافةً إلى التحكم بالكاحل في طور الدفع نحو الأعلى [9]، بينما دلت الدراسات النظرية على أنه يمكن لنموذج روبوتي وباستخدام خوارزمية التعلم المعزز أن يتجاوز اضطرابات تصل إلى 1.67% من طول الرجل الكلي [67].

بالخلاصة، يمكن القول أن نموذج التحكم العصبي المقترن أبسط من النموذج المقترن من قبل Huang، وأفضل من ناحية التنوع في الأداء وأنماط الحركة، إضافةً إلى أنه منح الروبوت استقراراً محلياً وعاماً جيداً، مع صلاة ضد اضطراب متمثل بتغيرات في استوائية الأرض التي يتحرك عليها الروبوت.

وبالنهاية ساهمت إعادة توزيع الكتل والأطوال في زيادة الأداء الطيفي وذلك بخفض الكلفة الميكانيكية للحركة على كامل مجال العمل، وهذا يدل على أهمية الاختيار الأمثل لمعاملات التصميم الميكانيكية في تحسين أداء الروبوتات التي تعتمد على ديناميكياتها الداخلية في أداء الحركة.

5- الخلاصة

تم في هذا الفصل عرض الخوارزمية المقترنة للتحكم بالروبوتات ثنائية الأرجل. تقوم الخوارزمية وبالاعتماد على مولدات النمط المركزية بتوليد حركات دورية تتتحكم بعزم ومرنة الروابط المرنة للنموذج الروبوتي. يتم التحكم بالنموذج باستخدام إشاراتي تحكم فقط: \ddot{u}_s إشارة الدخل المسؤولة عن التحكم بعزم الرابطة، \ddot{u}_e إشارة التحكم المسؤولة عن التحكم بمرنة الرابطة.

استخدمنا الخوارزمية السابقة للتحكم بنموذج روبوتي بست درجات حرية، وأثبتت الإجرائية أداءً جيداً من ناحية مجال السرع وأنماط الحركة التي يمكن بلوغها بتغيير إشاراتي الدخل (\ddot{u}_s, \ddot{u}_e)، إضافةً إلى الحركة الدورية من النمط الأول والاستقرار المحلي الجيد حول النقطة الثابتة في معظم فضاء العمل المعروف بقيم إشاراتي الدخل التي يتحقق عندهما الاستقرار.

نهايةً اقتربنا إجرائية تهدف إلى زيادة الصلاة ضد اضطراب ممثل بتغيرات في ارتفاع الأرض التي يتحرك عليها الروبوت. تعتمد هذه الإجرائية على إضافة معاملات إلى نموذج التحكم مرتبطة بالاضطراب المطبق، ولاحظنا من خلال التجارب على النموذج المدروس تحسيناً جيداً في صلاة الروبوت ضد الاضطراب باستخدام هذه الإجرائية.

الفصل السادس

الخاتمة والآفاق المستقبلية

الخاتمة

يتمثل الهدف الرئيسي من البحث المنجز بدراسة المبادئ الحاكمة لحركة المشي عند الإنسان وتوطين النماذج المعتمدة في هذا المجال وبالتحديد تلك التي تعتمد في حركتها على ديناميكها الداخلي والمبنية على أساس المبدأ غير المفعلن لما لهذه النماذج من إيجابيات تمثل بالصرف الطaci المنخفض ومشابهة حركة البشر. على الرغم من الإيجابيات السابقة تعاني هذه النماذج من عدد من السلبيات تمثل بانخفاض الصلاة ضد الاضطراب وضعف التنوع في الأداء، لذلك كان التوجه الرئيسي باتجاه المحافظة على إيجابيات هذه الطريقة في الحركة مع السعي لتجاوز سلبياتها.

يمكن تلخيص إجرائيات ونتائج البحث بالنقاط التالية:

- تم بدأً دراسة طائق النمذجة المحتملة للروبوت ثنائي الأرجل والمقارنة بين طريقتين في النمذجة؛ تعتمد الطريقة الأولى على استخدام مكتبة Matlab ضمن بيئة Simscape Multibody بينما تقوم الطريقة الثانية على النمذجة الديناميكية باستخدام المعادلات الرياضية ليتم استخدام هذه المعادلات في بناء نموذج حاسوبي باستخدام المكاملات الرقمية ضمن بيئة Matlab. اعتماداً على المقارنة بين طريقتي النمذجة اخترنا طريقة النمذجة باستخدام المعادلات الديناميكية لكونها تعطي مرونة وسرعة في الأداء مما يساعد في خدمة الهدف الموضوع للدراسة.
- قمنا ببناء نموذج حاسوبي لروبوت ثنائي الأرجل مستوى سبعة أجسام وست درجات حرية استخدمناه في دراستنا التالية.
- قمنا بتنفيذ دراسة تصميمية تهدف إلى اختيار معاملات التصميم الأمثلية التي تعطي أفضل أداء للروبوتات ثنائية الأرجل المعتمدة على ديناميكها الداخلي لما لهذه المعاملات من تأثير على أداء هذه الروبوتات.

تضمنت الدراسة التصميمية ما يلي:

- دراسة معاملات الأداء المختلفة للروبوتات ثنائية الأرجل والمقارنة فيما بينها واعتماد مجموعة من معاملات الأداء لتسخدم في دراستنا التصميمية.
- بناء إجرائية تهدف إلى أمثلة اختيار معاملات التصميم الميكانيكي باستخدام خوارزمية عناصر السرب وبالاعتماد على معاملات الأداء المختارة سابقاً الذكر.

و كنتيجة للدراسة التصميمية تم التوصل إلى مجموعة المعاملات التي تعطي الأداء الديناميكي الأفضل للنموذج الروبوتي.

- أجرينا دراسة تحكمية للنموذج الروبوتي الموضوع، حيث تم اقتراح خوارزمية للتحكم تدمج بين إيجابيات التحكم بالاعتماد على مولدات النمط المركزية وإيجابيات التحكم غير المفعّل المعتمد على الديناميكي الداخلي. تعتبر الخوارزمية المقترحة تطويراً لإجرائية مطروحة مسبقاً في الأديبات، وساهم التطوير المقترن في تبسيط الخوارزمية السابقة وزيادة أدائها من عدة نواحي تتعلق بتنوع أنماط الحركة وأالية الانتقال فيما بينها إضافةً إلى زيادة الاستقرار والصلادة ضد التغيرات في استوائية الأرض التي يتحرك عليها الروبوت.
- درسنا إمكانية تحسين أداء النموذج الروبوتي بعد تطبيق النموذج التحكمي باعتماد مجموعة من المعاملات التصميمية الأمثلية، وساهمت استراتيجية الأمثلة المقترنة في تحسين الأداء الطيفي للنموذج الروبوتي على كامل مجال العمل.

الأفاق المستقبلية

يعد هذا البحث انطلاقاً لدراسة الروبوتات ثنائية الأرجل، وتمهيداً لتأسيس محور بحث مرتبط بحركة هذه الروبوتات، وبالتالي فهو يوفر أرضية خصبة لانطلاق مجموعة كبيرة من الأبحاث في هذا المجال.

نورد فيما يلي مجموعة من المقترنات لتطوير هذا البحث:

- العمل على تطوير طريقة التحكم المعتمدة ودراسة تزويدها بخوارزمية تعمل على تحديد القيم المختلفة للمعاملات بشكل مباشر أثناء عمل الروبوت مثلاً باستخدام طريقة التعلم المعزّز.
- دراسة إضافة طبقات إضافية لنموذج التحكم العصبي المعتمد مما يساهم في زيادة الأداء وفق ظروف العمل المختلفة.
- دراسة دمج طريقة التحكم المعتمدة مع مفاهيم أخرى مرتبطة بالتحكم بالروبوتات ثنائية الأرجل كاستخدام مفهوم نقطة انعدام العزوم zero moment point لتحسين أداء النموذج ضد مختلف أنواع الاضطراب.
- دراسة طائق تحكم مختلفة عن طريقة التحكم المعتمدة في حالتنا ومقارنة الأداء بين الطائق المدرسة وصولاً إلى اختيار الطريقة الأنسب.
- العمل على دراسة المفعّلات المرنة التي تتمتع بالقدرة على تغيير مرونتها بشكل مباشر أثناء العمل، وتطوير نموذج حقيقي مناسب للاستخدام في أي نموذج مستقبلٍ لروبوت ثنائي الأرجل.
- العمل على بناء نموذج مخبري للنموذج الروبوتي المندرج حاسوبياً في دراستنا.

المراجع

- [1] Grimmer, Martin, Matthew Holgate, Robert Holgate, Alexander Boehler, Jeffrey Ward, Kevin Hollander, Thomas Sugar, and André Seyfarth. "A powered prosthetic ankle joint for walking and running." *BioMedical Engineering Online* 15 (2016): 141.
- [2] Honda. "Honda Robotics." global.honda. <https://global.honda/innovation/robotics/ASIMO.html> (accessed August 1, 2019).
- [2] Toyota. "Toyota Announces Overview of Toyota 'Partner Robot' Robots to Be Unveiled at Expo 2005, Starting March 2005." global.toyota. <https://global.toyota/en/detail/245497> (accessed August 1, 2019).
- [4] Boston Dynamics. "Atlas the World's Most Dynamic Humanoid." bostondynamics.com. <https://www.bostondynamics.com/atlas> (accessed August 1, 2019).
- [5] Ishida, Toru. "Development of a small biped entertainment robot QRIO." In *Micro-Nanomechatronics and Human Science, 2004 and The Fourth Symposium Micro-Nanomechatronics for Information-Based Society, 2004.*, pp. 23-28. IEEE, 2004.
- [6] Robotis. "Robotis." Robotis.com. <http://en.robotis.com> (accessed August 1, 2019).
- [7] van Zutven, P. W. M. "Control and identification of bipedal humanoid robots: stability analysis and experiments." (2014).
- [8] Wisse, M. "Essentials of dynamic walking: Fill me in." PhD diss., Ph. D. dissertation, TU Delft, Man Machine Systems, 2004.
- [9] Hobbelen, Daan GE, and Martijn Wisse. "Limit cycle walking." In *Humanoid Robots, Human-like Machines*. IntechOpen, 2007.
- [10] Sakagami, Yoshiaki, Ryujin Watanabe, Chiaki Aoyama, Shinichi Matsunaga, Nobuo Higaki, and Kikuo Fujimura. "The intelligent ASIMO: System overview and integration." In *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, vol. 3, pp. 2478-2483. IEEE, 2002.
- [11] Collins, Steve, Andy Ruina, Russ Tedrake, and Martijn Wisse. "Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers." *Science* 307, no. 5712 (2005): 1082-1085.
- [12] McGeer, Tad. "Passive dynamic walking." *I. J. Robotic Res.* 9, no. 2 (1990): 62-82.
- [13] McGeer, Tad. "Passive walking with knees." In *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1640-1645. IEEE, 1990.
- [14] Chen, Hsu. "Passive dynamic walking with knees: A point foot model." PhD diss., Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [15] Hobbelen, Daan GE, and Martijn Wisse. "Upper body feedback and feedforward control in limit cycle walkers." *IEEE Trans. Rob* (2010).
- [16] Hobbelen, Daan GE, and Martijn Wisse. "Ankle actuation for limit cycle walkers." *The International Journal of Robotics Research* 27, no. 6 (2008): 709-735.
- [17] Manoonpong, Poramate, Tomas Kulvicius, Florentin Wörgötter, Lutz Kunze, Daniel Renjewski, and Andre Seyfarth. "Compliant ankles and flat feet for improved self-stabilization and passive dynamics of the biped robot "RunBot"." In *2011 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 276-281. IEEE, 2011.
- [18] Cruz, Rafael Stanley Núñez, and Juan Manuel Ibarra Zannatha. "Efficient mechanical design and limit cycle stability for a humanoid robot: An application of genetic algorithms." *Neurocomputing* 233 (2017): 72-80.

- [19] Zang, Xizhe, Xinyu Liu, Yixiang Liu, Sajid Iqbal, and Jie Zhao. "Influence of the swing ankle angle on walking stability for a passive dynamic walking robot with flat feet." *Advances in Mechanical Engineering* 8, no. 3 (2016): 1687814016642018.
- [20] Zang, Xizhe, Xinyu Liu, Yongsheng Gao, Yixiang Liu, and Zhenkun Lin. "Development of a passive dynamic walking robot based on mechanical structural parameters optimization." In *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 1465-1470. IEEE, 2017.
- [21] Hobbelen, Daan GE, and Martijn Wisse. "Limit cycle walking." In *Humanoid Robots, Human-like Machines*. IntechOpen, 2007.
- [22] Pratt, Jerry, and Gill Pratt. "Intuitive control of a planar bipedal walking robot." In *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)*, vol. 3, pp. 2014-2021. IEEE, 1998.
- [23] Van Ham, Ronald, Bram Vanderborght, Michaël Van Damme, Björn Verrelst, and Dirk Lefeber. "MACCEPA, the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: Design and implementation in a biped robot." *Robotics and Autonomous Systems* 55, no. 10 (2007): 761-768.
- [24] Huang, Yan, Bram Vanderborght, Ronald Van Ham, Qining Wang, Michael Van Damme, Guangming Xie, and Dirk Lefeber. "Step length and velocity control of a dynamic bipedal walking robot with adaptable compliant joints." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 18, no. 2 (2012): 598-611.
- [25] Huang, Yan, Bram Vanderborght, Ronald Van Ham, and Qining Wang. "Torque–stiffness-controlled dynamic walking with central pattern generators." *Biological cybernetics* 108, no. 6 (2014): 803-823.
- [26] Huang, Yan, and Qining Wang. "Torque-stiffness-controlled dynamic walking: Analysis of the behaviors of bipeds with both adaptable joint torque and joint stiffness." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 23, no. 1 (2016): 71-82.
- [27] Huang, Yan, and Qining Wang. "Disturbance rejection of central pattern generator based torque–stiffness-controlled dynamic walking." *Neurocomputing* 170 (2015): 141-151.
- [28] Ijspeert, Auke Jan. "Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review." *Neural networks* 21, no. 4 (2008): 642-653.
- [29] Taga, Gentaro, Yoko Yamaguchi, and Hiroshi Shimizu. "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment." *Biological cybernetics* 65, no. 3 (1991): 147-159.
- [30] Dzeladini, Florin, Nadine Ait-Bouziad, and Auke Ijspeert. "CPG-based control of humanoid robot locomotion." *Humanoid Robotics: A Reference* (2018): 1-35.
- [31] Ijspeert, Auke Jan, Alessandro Crespi, Dimitri Ryczko, and Jean-Marie Cabelguen. "From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model." *science* 315, no. 5817 (2007): 1416-1420.
- [32] Fukuoka, Yasuhiro, Yasushi Habu, and Takahiro Fukui. "Analysis of the gait generation principle by a simulated quadruped model with a CPG incorporating vestibular modulation." *Biological cybernetics* 107, no. 6 (2013): 695-710.
- [33] Hansen, Andrew H., and Dudley S. Childress. "Effects of adding weight to the torso on roll-over characteristics of walking." *Journal of Rehabilitation Research & Development* 42, no. 3 (2005).
- [34] Hansen, Andrew H., Dudley S. Childress, and Erick H. Knox. "Roll-over shapes of human locomotor systems: effects of walking speed." *Clinical biomechanics* 19, no. 4 (2004): 407-414.

- [35] Hobbelen, Daan GE, and Martijn Wisse. "A disturbance rejection measure for limit cycle walkers: The gait sensitivity norm." *IEEE Transactions on robotics* 23, no. 6 (2007): 1213-1224.
- [36] Hass, Joachim, J. Michael Herrmann, and Theo Geisel. "Optimal mass distribution for passivity-based bipedal robots." *The International Journal of Robotics Research* 25, no. 11 (2006): 1087-1098.
- [37] Zang, Xizhe, Jifeng Bai, Yanhe Zhu, and Jie Zhao. "The global stability analysis of passive biped robot based on gradual point mapping—Cell mapping method." In *2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA)*, pp. 800-804. IEEE, 2013.
- [38] Mathworks. "Simscape Multibody" mathworks.com. <https://www.mathworks.com/products/simmechanics.html> (accessed August 1, 2019).
- [39] Liu, Y. F., J. Li, Z. M. Zhang, X. H. Hu, and W. J. Zhang. "Experimental comparison of five friction models on the same test-bed of the micro stick-slip motion system." *Mechanical Sciences* 6, no. 1 (2015): 15-28.
- [40] Weiss, P. L., R. E. Kearney, and I. W. Hunter. "Position dependence of ankle joint dynamics—I. Passive mechanics." *Journal of biomechanics* 19, no. 9 (1986): 727-735.
- [41] Sinkjaer, Thomas, Egon Toft, Steen Andreassen, and Birte C. Hornemann. "Muscle stiffness in human ankle dorsiflexors: intrinsic and reflex components." *Journal of neurophysiology* 60, no. 3 (1988): 1110-1121.
- [42] Huang, Yan, Qining Wang, Baojun Chen, Guangming Xie, and Long Wang. "Modeling and gait selection of passivity-based seven-link bipeds with dynamic series of walking phases." *Robotica* 30, no. 1 (2012): 39-51.
- [43] Wisse, Martijn, Daan GE Hobbelen, and Arend L. Schwab. "Adding an upper body to passive dynamic walking robots by means of a bisecting hip mechanism." *IEEE Transactions on Robotics* 23, no. 1 (2007): 112-123.
- [44] Dempster, Wilfrid Taylor, and George RL Gaughran. "Properties of body segments based on size and weight." *American journal of anatomy* 120, no. 1 (1967): 33-54.
- [45] Hsu, C. S. "Global analysis by cell mapping." *International Journal of bifurcation and chaos* 2, no. 04 (1992): 727-771.
- [46] Huang, Yan, Qining Wang, Guangming Xie, and Long Wang. "Optimal mass distribution for a passive dynamic biped with upper body considering speed, efficiency and stability." In *Humanoids 2008-8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 515-520. IEEE, 2008.
- [47] Wang, Qining, Kunlin Wei, Long Wang, and Dongjiao Lv. "Modeling and stability analysis of human normal walking with implications for the evolution of the foot." In *2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp. 479-484. IEEE, 2010.
- [48] Wisse, Martijn, Daan GE Hobbelen, Remco JJ Rotteveel, Stuart O. Anderson, and Garth J. Zeglin. "Ankle springs instead of arc-shaped feet for passive dynamic walkers." In *2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 110-116. IEEE, 2006.
- [49] Jeon, Yonggwon, Youn-sik Park, and Youngjin Park. "A study on stability of limit cycle walking model with feet: Parameter study." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10, no. 1 (2013): 49.
- [50] Wisse, Martijn. "Three additions to passive dynamic walking; actuation, an upper body, and 3D stability." In *4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, 2004.*, vol. 1, pp. 113-132. IEEE, 2004.
- [51] Eberhart, Russell, and James Kennedy. "Particle swarm optimization." In *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks*, vol. 4, pp. 1942-1948. 1995.

- [52] Wu, Yao, Daojin Yao, and Xiaohui Xiao. "The effects of ground compliance on flexible planar passive biped dynamic walking." *Journal of Mechanical Science and Technology* 32, no. 4 (2018): 1793-1804.
- [53] Wang, Kunyang, Pablo Tena Tobajas, Jing Liu, Tao Geng, Zhihui Qian, and Lei Ren. "Towards a 3D passive dynamic walker to study ankle and toe functions during walking motion." *Robotics and Autonomous Systems* 115 (2019): 49-60.
- [54] Wu, Yao, Daojin Yao, and Xiaohui Xiao. "Optimal Design for Flexible Passive Biped Walker Based on Chaotic Particle Swarm Optimization." *Journal of Electrical Engineering & Technology* 13, no. 6 (2018): 2493-2503.
- [55] Collard, Jean-François. "Geometrical and kinematic optimization of closed-loop multibody systems Optimisation géométrique et cinématique de systèmes multicorps avec boucles cinématiques." PhD diss., UCL., 2007.
- [56] Vanderborght, Bram, Björn Verrelst, Ronald Van Ham, Michaël Van Damme, Dirk Lefeber, Bruno Meira Y. Duran, and Pieter Beyl. "Exploiting natural dynamics to reduce energy consumption by controlling the compliance of soft actuators." *The International Journal of Robotics Research* 25, no. 4 (2006): 343-358.
- [57] Yamaguchi, Jin'ichi, Daisuke Nishino, and Atsuo Takanishi. "Realization of dynamic biped walking varying joint stiffness using antagonistic driven joints." In *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)*, vol. 3, pp. 2022-2029. IEEE, 1998.
- [58] Wang, Zhipeng, Bin He, Runjie Shen, and Weibin Meng. "Contact impact inhibition strategy for biped robot walking based on central pattern generator." In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 733-738. IEEE, 2015.
- [59] Baydin, Atılım Güneş. "Evolution of central pattern generators for the control of a five-link bipedal walking mechanism." *Paladyn, Journal of Behavioral Robotics* 3, no. 1 (2012): 45-53.
- [60] Endo, Gen, Jun Morimoto, Jun Nakanishi, and Gordon Cheng. "An empirical exploration of a neural oscillator for biped locomotion control." In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004*, vol. 3, pp. 3036-3042. IEEE, 2004.
- [61] de Paiva, Rafael Cortes, Alexandre Ricardo Soares Romariz, and Geovany Araújo Borges. "Searching cpg parameters for humanoid gait using particle swarm optimization and genetic algorithm." In *2013 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pp. 1-6. IEEE, 2013.
- [62] Mori, Takeshi, Yutaka Nakamura, Masa-Aki Sato, and Shin Ishii. "Reinforcement learning for cpg-driven biped robot." In *AAAI*, vol. 4, pp. 623-630. 2004.
- [63] Matsuoka, Kiyotoshi. "Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation." *Biological cybernetics* 52, no. 6 (1985): 367-376.
- [64] Williamson, Matthew M. "Neural control of rhythmic arm movements." *Neural networks* 11, no. 7-8 (1998): 1379-1394.
- [65] Matsuoka, Kiyotoshi. "Analysis of a neural oscillator." *Biological Cybernetics* 104, no. 4-5 (2011): 297-304.
- [66] Geng, Tao, Bernd Porr, and Florentin Wörgötter. "Fast biped walking with a sensor-driven neuronal controller and real-time online learning." *The International Journal of Robotics Research* 25, no. 3 (2006): 243-259.
- [67] Schuitema, Erik, Daan GE Hobbelink, Pieter P. Jonker, Martijn Wisse, and JG Daniël Karssen. "Using a controller based on reinforcement learning for a passive dynamic walking robot." In *5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2005.*, pp. 232-237. IEEE, 2005.