

HIAST/ISSAT 2019

الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم النظم الإلكترونية والميكاترونكس

## رسالة ماجستير في الروبوتيك والتحكم

---

### تطوير نموذج رياضي لسائق بهدف التحكم بنظام مساعدة القيادة الكهربائي

Development of Human Driver Model for Control of Electric Power  
Assist Steering system

---

الطالب : م. أحمد حافظ

المشرف : د. علاء معروف

## المخلص

نهتم في هذا البحث بتطوير نموذج رياضي لذراع السائق بهدف تطوير أنظمة مساعدة القيادة الكهربائية EPAS ، حيث نعرض بدايةً دراسة مرجعية عن طرق نمذجة السائق، تشمل الدراسة على آلية عمل العضلات وآلية توليد القوة فيها وكيفية نمذجة الخواص الميكانيكية لها، كما تشمل الدراسة بعض المعايير التي تهدف لدراسة سلوك ذراع الإنسان أثناء تأديتها لمهمة معينة. نناقش ثانياً عدد درجات الحرية الأصغرية اللازمة لمحاكاة حركة ذراع السائق قدر الإمكان وذلك تبعاً لوضعية المقود، ثم نتطرق لدراسة موسعة لنموذج الذراع المقترح وذلك بالاستفادة من مبادئ الأذرع الآلية، حيث نعرض النماذج الرياضية المختلفة اللازمة لدراسة مهمة القيادة، ونبين دور تفعيل العضلات الأساسي في تغير عزم الذراع، ثم نوسع نموذج ذراع السائق ليشمل مساهمة تفعيل العضلات في توليد العزم وذلك بإضافة متحكم صلد لاخطي. ثم نتحقق من النموذج المقترح عملياً باستخدام معطيات عملية تم تحصيلها من مقلد قيادة. أخيراً نعرض دراسة مرجعية لطرائق مطابقة الخواص المرنة-اللزجة لذراع السائق، ثم نقترح طريقة لمطابقة الخواص المرنة-اللزجة لنموذج ذراع السائق المقترح ذو ثلاث درجات حرية وذلك باستخدام قياسات عملية لدرجة حرية واحدة. أظهرت النتائج فعالية الطريقة المقترحة.

# Abstract

This thesis is concerned with development of mathematical model of driver arm to develop EPAS Electrical Power Assist Steering systems. First, we present a literature survey of driver modeling methods. This study contains an explanation of muscle-torque generating system and muscles' mechanical properties modelling. The study also contains some principles that tries to predict human arm behavior under certain circumstances. Second, we present a discussion on the pose of the steering wheel and the minimum degree of freedom required to simulate the movements of the driver's arm. We study the suggested arm model as a robotic arm and we find its direct kinetic model, inverse kinetic model, differential model and dynamic model. We show the essential role of muscle activation and muscle contraction in changing arm torque. Next, we extend the model of the driver's arm to include the contribution of muscle activation by using a robust nonlinear controller. We validate the extended model using experimental data collected through measurement performed using Hardware-In-the-Loop Simulations HILS. Finally, a literature study of human driver arm identification methods is presented. An identification method of driver's arm viscoelastic properties is developed. The identification method is developed using three degree of freedom model and one degree of freedom measurements. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

## كلمة الشكر

أوجه الشكر إلى الدكتور المشرف د. علاء معروف الذي لم يدخر إي مجهود في سبيل إتمام هذا العمل ولم يتوانى عن تقديم النصائح والإرشادات طوال فترة العمل، كما أنه أمدني بجرعات من الأمل في أوقات اليأس واستمر بالتحفيز في لحظات التقدم والنجاح.

## قائمة الأشكال

2	النموذج المقترح من قبل Pick لنمذجة السائق	شكل 1.1
3	نموذج الألياف المنزلقة المقترح من قبل Huxley	شكل 2.1
4	نموذج Hill المقترح للعضلات والذي يتألف من ثلاث عناصر	شكل 3.1
4	القوة المولد من العضلة أثناء القيام بعملية شد، ويوضح تغير القوة في كل عنصر من العناصر الثلاث لنموذج Hill	شكل 4.1
5	نموذج الذراع المستخدم من قبل Uno	شكل 5.1
7	نموذج الذراع المستخدم في الدراسة من قبل Ohta	شكل 6.1
7	النموذج المستخدم من قبل Kashima لدراسة حركة الذراع	شكل 7.1
8	رسم تمثيلي بسيط يوضح مبدأ عمل النماذج التي تعتمد على نقطة مشاهدة واحدة	شكل 8.1
8	مشاهدة واحدة	
9	مبدأ المتحكم الأمثلي المستخدم من قبل MacAdams	شكل 9.1
10	مبدأ المتحكم الأمثلي المستخدم من قبل Sharp	شكل 10.1
13	مقطع تشريحي لذراع الإنسان وموضع المفاصل والعظام الرئيسية	شكل 1.2
15	وضعية السائق وتوضع الذراعين	شكل 2.2
15	حركة الذراع (درجة حرية واحدة)	شكل 3.2
16	حركة الذراع (درجة حرية واحدة) في المستوي الأفقي	شكل 4.2
17	حركة الذراع (درجتى حرية) في المستوي الشاقولي	شكل 5.2
18	حركة الذراع (درجتى حرية) في المستوي الأفقي	شكل 6.2
19	حركة الذراع (درجتى حرية) ثلاثة أبعاد	شكل 7.2
19	نموذج الذراع بثلاث درجات حرية ويظهر توضع الجمل لكل من الروابط الدورانية لذراع السائق،	شكل 8.2
20	الدورانية لذراع السائق،	
23	توضع الذراع بالنسبة لجملة الأحداثيات المرجعية $Rf_0$	شكل 9.2
32	آلية اختبار العزم الكلي لذراع السائق في وضع التوازن	شكل 10.2
33	استحابة النموذج في وضع التوازن لإشارة دخل على شكل شبه منحرف	شكل 11.2
33	استحابة النموذج في وضع التوازن لإشارة دخل جيبيية	شكل 12.2
38	المخطط الصندوقي للتحكم الصلد بالذراع الآلي	شكل 13.2

41	شكل 14.2	المخطط الصندوقي لجملة السيارة والذراع
42	شكل 15.2	شكل المتحول الرباطي $q_1$ في حالة إشارة دخل $\theta_{ref}$ جيبيية
42	شكل 16.2	شكل المتحول الرباطي $q_2$ في حالة إشارة دخل $\theta_{ref}$ جيبيية
43	شكل 17.2	شكل المتحول الرباطي $q_3$ في حالة إشارة دخل $\theta_{ref}$ جيبيية
44	شكل 18.2	شكل المتحول $\dot{q}_1$ في حالة إشارة دخل $\theta_{ref}$ جيبيية
44	شكل 19.2	شكل المتحول $\dot{q}_2$ في حالة إشارة دخل $\theta_{ref}$ جيبيية
45	شكل 20.2	شكل المتحول $\dot{q}_3$ في حالة إشارة دخل $\theta_{ref}$ جيبيية
46	شكل 21.2	زاوية المقود $\theta_c$ في حالة إشارة دخل $\theta_{ref}$
	شكل 22.2	السرعة الزاوية للمقود $\dot{\theta}_c$ في حالة إشارة دخل $\theta_{ref}$ إشارة سرعة مرجعية $\dot{\theta}_{ref}$
46	شكل 23.2	المخطط الصندوقي لاختبار نموذج الذراع باستخدام المعطيات العملية.
47	شكل 24.2	المتحول الرباطي $q_1$ الذي يولده نموذج الذراع والمتحول الرباطي المرجعي $q_{1ref}$
48	شكل 25.2	المتحول الرباطي $q_2$ الذي يولده نموذج الذراع والمتحول الرباطي المرجعي $q_{2ref}$
48	شكل 26.2	المتحول الرباطي $q_3$ الذي يولده نموذج الذراع والمتحول الرباطي المرجعي $q_{3ref}$
49	شكل 27.2	زاوية المقود المقاسة $\theta_{measured}$ والتي تستخدم كإشارة مرجعية وزاوية المقود التي يمكن أن يولدها نموذج الذراع $\theta_c$
49	شكل 28.2	السرعة الرباطية $\dot{q}_1$ التي يولده نموذج الذراع والسرعة الرباطية المرجعية $\dot{q}_{1ref}$
50	شكل 29.2	السرعة الرباطية $\dot{q}_2$ التي يولده نموذج الذراع والسرعة الرباطية المرجعية $\dot{q}_{2ref}$
51	شكل 30.2	السرعة الرباطية $\dot{q}_3$ التي يولده نموذج الذراع والسرعة الرباطية المرجعية $\dot{q}_{3ref}$
51	شكل 31.2	السرعة الزاوية المقاسة للمقود $\dot{\theta}_{measured}$ والسرعة الزاوية للمقود التي يمكن أن يولدها نموذج الذراع $\dot{\theta}_c$
52	شكل 32.2	مركبات شعاع العزم $\tau_a$ الثلاث
53	شكل 33.2	العزم المطبق من نموذج الذراع على المقود $T_d$
54	شكل 34.2	العلاقة الخطية بين العزم المطبق من نموذج الذراع على المقود $T_d$
54	شكل 35.2	العزم المطبق من نموذج الذراع $T_{down}$ من دون رد قوى الجاذبية وقوى كوريوليس على المقود
55	شكل 36.2	العلاقة الخطية بين العزم المطبق من نموذج الذراع على المقود $T_{down}$
55	شكل 1.3	المخطط الصندوقي لعملية المطابقة

65	شکل 2.3	المركبة الأولى $l_1$ من الشعاع $l$ والمركبة الأولى المقدره $\hat{l}_1$ . . . . .
	شکل 3.3	العلاقة الخطية بين المركبة الأولى $l_1$ من الشعاع $l$ والمركبة الأولى المقدره $\hat{l}_1$ . . . . .
65	شکل 4.3	المركبة الثانية $l_2$ من الشعاع $l$ والمركبة الثانية المقدره $\hat{l}_2$ . . . . .
66	شکل 5.3	العلاقة الخطية بين المركبة الثانية $l_2$ من الشعاع $l$ والمركبة الثانية المقدره $\hat{l}_2$ . . . . .
66	شکل 6.3	المركبة الثالثة $l_3$ من الشعاع $l$ والمركبة الثالثة المقدره $\hat{l}_3$ . . . . .
67	شکل 7.3	العلاقة الخطية بين المركبة الثالثة $l_3$ من الشعاع $l$ والمركبة الثالثة المقدره $\hat{l}_3$ . . . . .
67	شکل 8.3	خواص ذراع السائق اللزجة المرنة المتغير مع الزمن (القسم الأول) . . .
68	شکل 9.3	خواص ذراع السائق اللزجة المرنة المتغير مع الزمن (القسم الثاني) . . .
69	شکل 10.3	خواص ذراع السائق اللزجة المرنة المتغير مع الزمن (القسم الثالث) . . .
70		

# قائمة الجداول

جدول 1.2 متحولات Denavit-Hartenberg للمعدلة لذراع السائق ..... 19



# الاختصارات

الاختصار	الوصف
AgM	Agonist Muscle
AM	Alpha Motors
ARMA	Autoregressive moving Average Model
AtM	Antagonist Muscle
CC	Contractile Component
CE	Cylindrical Element
CNS	Central Nervous System
DAS	Driver Assistance Systems
diag	Diagonal Matrix
EMG	Electromyography
EP	Equilibrium Point
EPAS	Electronic Power Assisted Steering
EPS	Electric Power Steering
EWRLS	Exponentially Weighted Recursive Least Squares
HPS	Hydraulic Power Steering
LQR	Linear-Quadratic Regulator
MA	Muscle Activation
MC	Muscle Contraction
MCC	Muscle Co-Contraction
MHFC	Minimum Hand Force Change
MJM	Minimum-Jerk Motion
MMFC	Minimum Muscle Force Change
MPC	Model Predictive Controller
MSS	Musculoskeletal System
MTC	Minimum Torque-Change

الاختصار	الوصف
MU	Motor Unite
NMS	Neuromuscular System
PD	Proportional-Derivative controller
PEC	Parallel Elastic Component
RME	Reduce Metabolic Energy
SEC	Series Elastic Component
TS	Transition State

# الرموز

الرمز	الوصف
${}^0T_B$	التحويل المتجانس الذي ينقل من جملة المقود إلى الجملة المرجعية للذراع
${}^0R_B$	مصفوفة الدوران بين الجملتين $RF_0$ مكتوب في $RF_B$
$a_m$	ثابت علاقة Hill
$B$	مصفوفة العطالة الخاصة بالذراع
$\tilde{B}$	الفرق بين القيم الحسابية المقدرة والقيم الحقيقية لمصفوفة عطالة الذراع
${}^BT_0$	التحويل المتجانس الذي ينقل من الجملة المرجعية للذراع إلى جملة المقود
${}^BF_a$	القوة الكلية التي تولدها الذراع والمكتوبة في الجملة المرجعية $RF_B$
$B_M$	الحد الأعلى لمقلوب مصفوفة العطالة
$B_m$	الحد الأدنى لمقلوب مصفوفة العطالة
$b_m$	ثابت علاقة Hill
$\hat{B}$	القيم الحسابية المقدرة لمصفوفة عطالة الذراع
$c$	شعاع قوى الطرد المركزية وقوة كوريوليس وله ثلاث مركبات $c_{h1}, c_{h2}, c_{h3}$
$c_i$	$\cos(q_i) \quad : i = 1, 2, 3$
$c_{ij}$	$\cos(q_i + q_j) \quad : i, j = 1, 2, 3$
$c_{ijk}$	$\cos(q_i + q_j + q_k) \quad : i, j, k = 1, 2, 3$
$c_{zq}$	مشتق $c$ بالتسبة للمتحويلات الرباطية $q$ .
$c_{z\dot{q}}$	مشتق $c$ بالتسبة للسرع الرباطية $\dot{q}$ .
$c_\alpha$	$\cos(\alpha)$
$c_\theta$	$\cos(\theta_c)$
$d_1$	بعد مركز عطالة العضد عن الكتف

الرمز	الوصف
$d_2$	بعد مركز عطالة الساعد عن المرفق
$D_m$	مصفوفة لزوج الذراع أو شعاع الخواص اللزجة .
$d_s$	المسافة بين مركزي الكتفين
$D_v$	شعاع لزوج الذراع أو شعاع الخواص اللزجة .
$d_{ws}$	المسافة مستوي المقود ومنتصف القطعة الواصلة بين مركزي الكتفين
$e_r$	الشعاع المماسي المرتبط باليد اليمنى
$F_a$	القوة الكلية التي تولدها الذراع والمكتوبة في الجملة المرجعية $RF_0$
$F_c$	القوة المولدة في العضلة الناتجة عن عناصر التقلص
$F_{eff}$	القوة الكلية الفعالة المسؤولة عن تدوير المقود والناتجة عن إسقاط ${}^B F_a$ على الشعاع المماسي $e_r$
$F_{ext}$	القوة الخارجية المؤثرة على الذراع في نقطة تثبيتها على المقود نتيجة وجود العزم المقاوم $T_r$
$F_p$	القوة المرنة المولدة في العضلة الناتجة عن النابض التقرعي
$F_r$	القوة المعبرة عن العزم المقاوم $T_r$ والمحمولة على الشعاع المماسي $e_r$
$F_{rw}$	قوة احتكاك الدواليب بالأرض.
$F_t$	القوة المولدة من العضلات والناتجة عند الاوتار
$G$	شعاع قوى قوى الجاذبية
${}^{i-1}R_i$	مصفوفة الدوران بين الجملتين $RF_i$ مكتوب في $RF_{i-1}$ حيث أن $i = 0, 1, 2, 3$
${}^{i-1}r_{i-1,i}$	مركز عطالة $RF_i$ مكتوب في $RF_{i-1}$ حيث أن $i = 0, 1, 2, 3$
$I_{c1}$	هي مصفوفة العطالة الأساسية للجزء 1 من الذراع وهي مصفوفة قطرية عناصر أقطارها هي عزوم العطالة الرئيسية $I_{1xx}, I_{1yy}, I_{1zz}$
$I_{c2}$	هي مصفوفة العطالة الأساسية للجزء 2 من الذراع وهي مصفوفة قطرية عناصر أقطارها هي عزوم العطالة الرئيسية $I_{2xx}, I_{2yy}, I_{2zz}$
$I_{ci}$	مصفوفة العطالة الجزء ( $i$ ) من الذراع حيث أن $i = 1, 2$

الرمز	الوصف
$I_m$	المصفوفة الواحدية
${}^i v_i$	سرعة مركز الجملة $RF_i$ مكتوب في $RF_i$ حيث أن $i = 0, 1, 2, 3$
${}^i \omega_i$	السرعة الزاوية للجسم $(i)$ مكتوب في $RF_i$ حيث أن $i = 0, 1, 2, 3$
$J$	المصفوفة اليعقوبية
$J^{-1}$	مقلوب المصفوفة اليعقوبية
${}^j T_i$	التحويل المتجانس الذي ينقل من الجملة $(i)$ إلى جملة أخرى $(j)$ ، وتأخذ $(i)$ و $(j)$ احد القيم التالية $(i, j = 0, 1, 2, 3)$
$\dot{J}$	مشتق المصفوفة اليعقوبية بالنسبة للزمن
$K$	المصفوفة المكونة من المصفوفتين $K_P, K_D$ بحيث $K = [K_P \ K_D]$
$K_D$	مصفوفة معرفة موجبة
$K_P$	مصفوفة معرفة موجبة
$l_1$	طول العضد
$l_2$	طول الساعد
$l_i$	طول الجزء $(i)$ من الذراع حيث أن $(i)$ يمكن أن تأخذ أحد القيم التالية 1, 2
$m_i$	كتلة الجزء $(i)$ من الذراع حيث أن $(i)$ يمكن أن تأخذ أحد القيم التالية 1, 2
$n$	شعاع الحدود اللاخطية في ديناميك الذراع ويشمل شعاع كوريوليس $c$ وشعاع الجاذبية $G$ والقوى الخارجة المؤثرة على الذراع $F_{ext}$
$\tilde{n}$	الفرق بين القيم الحسابية المقدرة والقيم الحقيقية لشعاع الحدود اللاخطية
$\mathcal{N}$	الفضاء الصفري
$n_r$	الشعاع الناظمي المرتبط باليد اليمنى
$\hat{n}$	القيم الحسابية المقدرة لشعاع الحدود اللاخطية
$O_m$	مصفوفة صفرية $(3 \times 3)$ $O_m$
$P$	مصفوفة متناظرة معرفة موجبة تستخدم لحل معادلة ليابونوف وعناصر قطرها $P_i$ ، وتأخذ $(i)$ أحد القيم التالية 1, 2, 3, 4, 5, 6

الرمز	الوصف
$P_d$	مصفوفة التغيرات
$P_m$	الحمل المطبق على العضلة
$Q$	حل معادلة ليابونوف المستمرة وهي مصفوفة متناظرة معرفة موجبة
$q$	النموذج الهندسي العكسي ويعبر عن المتحولات الرباطية (زوايا المفاصل) وله ثلاث مركبات $q_1, q_2, q_3$
$\tilde{q}$	الفرق بين القيم الرباطية المرغوبة والقيم الحقيقية
$q_d$	القيم الرباطية المرغوبة
$q_{im5}$	المتحولات الرباطية (زوايا المفاصل) الموافقة لزاوية دوران المقود $\theta_{ref}$ في حالة استخدام نقصان القيم الاسمية للأطوال والكتل وعزوم العطالة بمقدار (-5) ويمكن أن تأخذ ( $i$ ) أحد القيم التالية 1, 2, 3
$q_{in}$	المتحولات الرباطية (زوايا المفاصل) الموافقة لزاوية دوران المقود $\theta_{ref}$ في حالة استخدام القيم الاسمية للأطوال والكتل وعزوم العطالة ويمكن أن تأخذ ( $i$ ) أحد القيم التالية 1, 2, 3
$q_{ip5}$	المتحولات الرباطية (زوايا المفاصل) الموافقة لزاوية دوران المقود $\theta_{ref}$ في حالة استخدام زيادة القيم الاسمية للأطوال والكتل وعزوم العطالة بمقدار (+5) ويمكن أن تأخذ ( $i$ ) أحد القيم التالية 1, 2, 3
$q_{iref}$	المتحولات الرباطية (زوايا المفاصل) الموافقة لزاوية دوران المقود الحقيقية $\theta_{ref}$ ويمكن أن تأخذ ( $i$ ) أحد القيم التالية 1, 2, 3
$Q_m$	القيمة العظمى للتسارعات الرباطية
$\dot{q}$	السرع الزاوية للروابط وهي ثلاث مركبات $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3$
$\tilde{\dot{q}}$	الفرق بين السرع الرباطية المرغوبة والقيم الحقيقية
$\dot{q}_d$	السرع الرباطية المرغوبة
$\dot{q}_{im5}$	السرع الرباطية الموافقة لزاوية دوران المقود $\theta_{ref}$ وسرعة دوران $\dot{\theta}_{ref}$ في حالة استخدام زيادة القيم الاسمية للأطوال والكتل وعزوم العطالة بمقدار (-5) ويمكن أن تأخذ ( $i$ ) أحد القيم التالية 1, 2, 3

الوصف	الرمز
السرعة الرباطية الموافقة لزاوية دوران المقود $\theta_{ref}$ وسرعة دوران $\dot{\theta}_{ref}$ في حالة استخدام القيم الاسمية للأطوال والكتل وعزوم العطالة ويمكن أن تأخذ ( $i$ ) أحد القيم التالية 1, 2, 3	$\dot{q}_{in}$
السرعة الرباطية الموافقة لزاوية دوران المقود $\theta_{ref}$ وسرعة دوران $\dot{\theta}_{ref}$ في حالة استخدام زيادة القيم الاسمية للأطوال والكتل وعزوم العطالة بمقدار (+5) ويمكن أن تأخذ ( $i$ ) أحد القيم التالية 1, 2, 3	$\dot{q}_{ip5}$
السرعة الزاوية للروابط الموافقة لزاوية دوران المقود الحقيقية $\theta_{ref}$ ولسرعة دوران المقود الحقيقية $\dot{\theta}_{ref}$ ويمكن أن تأخذ ( $i$ ) أحد القيم التالية 1, 2, 3	$\dot{q}_{iref}$
التسارعات الزاوية للروابط وهي ثلاث مركبات $\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ddot{q}_3$	$\ddot{q}$
الفرق بين التسارعات الرباطية المرغوبة والقيم الحقيقية	$\ddot{q}$
التسارعات الرباطية المرغوبة	$\ddot{q}_d$
نصف قطر المقود	$r$
مركز عطالة الجزء ( $i$ ) مكتوب في $RF_i$	$r_{ci}$
جملة الإحداثيات المرجعية المرتبطة بمركز الكتف للذراع اليمنى	$RF_0$
جملة الإحداثيات المرجعية المرتبطة بالمقود	$RF_B$
جملة إحداثيات مرجعية حيث $i=1,2,3$	$RF_i$
مصنوفة صلابة الذراع أو مصنوفة الخواص المرنة.	$R_m$
شعاع صلابة الذراع أو شعاع الخواص المرنة.	$R_v$
$\sin(q_i) \quad : i = 1, 2, 3$	$s_i$
$\sin(q_i + q_j) \quad : i, j = 1, 2, 3$	$s_{ij}$
$\sin(q_i + q_j + q_k) \quad : i, j, k = 1, 2, 3$	$s_{ijk}$
$\sin(\alpha)$	$s_\alpha$
$\sin(\theta_c)$	$s_\theta$
الطاقة الحركية الكلية للذراع	$T$
عزم القوة $F_{eff}$ الكلي الفعال المسؤول عن تدوير المقود وهو العزم المقدم من النموذج	$T_d$

الوصف	الرمز
العزم المقدم من النموذج بعد استبعاد قوى كوريوليس والجزائية	$T_{down}$
عزم السائق الحقيقي المقاس عن طريق حساسات عزم والمُحصل عن طريق مقلدات قيادة.	$T_{measured}$
العزم المقاوم الناتج عن محاولة السائق لتغيير موضع المقود أي تغيير الزاوية $\theta_c$	$T_r$
دور التقطيع	$T_s$
الطاقة الكامنة الكلية للذراع	$U$
إشارة التحكم من الجهاز العصبي المركزي CNS	$u_m$
تابع ليابونوف	$V$
السرعة الخطية لمركز عطالة الجزء $(i)$ من الذراع حيث أن $i = 1, 2$	$v_{ci}$
السرعة الخطية لمركز الجملة $RF_i$ المرتبطة بالجزء $(i)$	$v_i$
سرعة تقلص العضلة	$v_m$
النموذج الهندسي المباشر يعبر عن إحداثيات اليد بالنسبة لمركز الكتف وله ثلاث مركبات $x, y, z$	$X$
مركز إحداثيات جملة المقود $RF_B$ في الجملة الأساسية للذراع $RF_0$	$X_{0B}$
سرعة اليد في الإحداثيات الديكارتية ولها ثلاث مركبات $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$	$\dot{X}$
تسارع اليد في الإحداثيات الديكارتية وله ثلاث مركبات $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$	$\ddot{X}$
قانون التحكم الصلب	$y_r$
متحول وسيط بحيث $z = D^T Q \xi$	$z$
المتحولات الديناميكية .	$Z_i$
رمز لأحد أطراف عبارة المطابقة	$\ell$
المشتق الجزئي للمصفوفة أو الشعاع التالي لها .	$\partial$
مصفوفة المعلومات المقاسة أو Regressor.	$\Phi$
الحد الأعلى للمصفوفة $\tilde{n}$	$\Phi_n$
يعبر عن الطرف الأيسر من علاقة ديناميك الذراع يستخدم ضمن عمليات المطابقة.	$\Psi$
زاوية ميلان المقود	$\alpha$



الوصف	الرمز
الحد الأعلى للمصفوفة $\tilde{B}$	$\alpha_r$
التغيرات الصغيرة للمصفوفة أو الشعاع التالي لها .	$\delta$
معامل التخميد المرغوب للرابطة $(i)$ ، وتأخذ $(i)$ أحد القيم التالية 1, 2, 3	$\zeta_i$
أثر وجود المصفوفات $\tilde{n}$ و $\tilde{B}$ على التسارعات الرباطية	$\eta$
$\tilde{q}$	
زاوية دوران المقود	$\theta_c$
السرعة الزاوية للمقود	$\dot{\theta}_c$
التسارع الزاوي للمقود	$\ddot{\theta}_c$
معامل التثقيب	$\lambda$
شعاع الحالة المكون من $\tilde{q}$ و $\dot{\tilde{q}}$	$\xi$
عدد موجب يمثل ربح الحد المتقطع $\omega_r$ في قانون التحكم $y_r$	$\rho$
شعاع العزوم عند الرباط	$\tau$
شعاع العزوم عند الرباط في حال وجود القوة الخارجية $F_{ext}$ وله ثلاث مركبات $\tau_{1a}$ $\tau_{2a}$ $\tau_{3a}$	$\tau_a$
عزوم القوى الخارجية المؤثرة على الذراع وله ثلاث مركبات $[\tau_{ext1} \tau_{ext2} \tau_{ext3}]^T$	$\tau_{ext}$
شعاع المتحولات الكلي ويضم المتحولات الديناميكية والمتحولات المرنة والمتحولات اللزجة ويأخذ الشكل $\chi = [Z ; R_v ; D_v]$	$\chi$
شعاع البارامترات المقدره	$\hat{\chi}$
السرعة الدورانية للجزء $(i)$ من الذراع حيث أن $i = 1, 2$	$\omega_i$
التردد الطبيعي المرغوب للرابطة $(i)$ ، وتأخذ $(i)$ أحد القيم التالية 1, 2, 3	$\omega_{ni}$
حد التحكم المتقطع الذي يضمن الصلادة بالنسبة لتغيرات $\tilde{\eta}$	$\omega_r$

# الفهرس

IV	قائمة الأشكال
VII	قائمة الجداول
VIII	الاختصارات
X	الرموز
1	1 الدراسة المرجعية
1	1.1 مقدمة
1	2.1 الدراسات المرجعية
2	1.2.1 آلية عمل العضلات
5	2.2.1 فهم سلوك الذراع
6	3.2.1 نمذجة CNS
12	2 تطوير نموذج رياضي لذراع السائق
12	1.2 مقدمة
13	2.2 تعريف المسألة
14	3.2 نموذج الذراع بدرجة حرية واحدة
16	4.2 نموذج الذراع بدرجتين حرية
16	1.4.2 نماذج مستوية
17	2.4.2 نموذج بثلاث أبعاد
18	5.2 نموذج الذراع بثلاث درجات حرية
18	1.5.2 النموذج الهندسي المباشر
22	2.5.2 النموذج الهندسي العكسي
23	3.5.2 النموذج التفاضلي
24	4.5.2 النموذج التفاضلي العكسي
25	5.5.2 النموذج الديناميكي

30	..... محاكاة النموذج	6.2
34	..... تعويض مساهمة تفعيل العضلات	7.2
34	..... تصميم قانون تحكم	1.7.2
40	..... محاكاة قانون التحكم	2.7.2
47	..... التحقق العملي من النموذج المقترح	8.2
53	..... خاتمة	9.2
57	<b>مطابقة الخواص اللزجة المرنة لذراع السائق</b>	<b>3</b>
57	..... مقدمة	1.3
58	..... صياغة مسألة المطابقة	2.3
63	..... حل مسألة المطابقة	3.3
63	..... النتائج الأولية لعملية المطابقة	4.3
64	..... خاتمة	5.3
72	<b>النتائج والآفاق المستقبلية</b>	<b>4</b>
72	..... النتائج	1.4
73	..... الآفاق المستقبلية	2.4

# الفصل 1

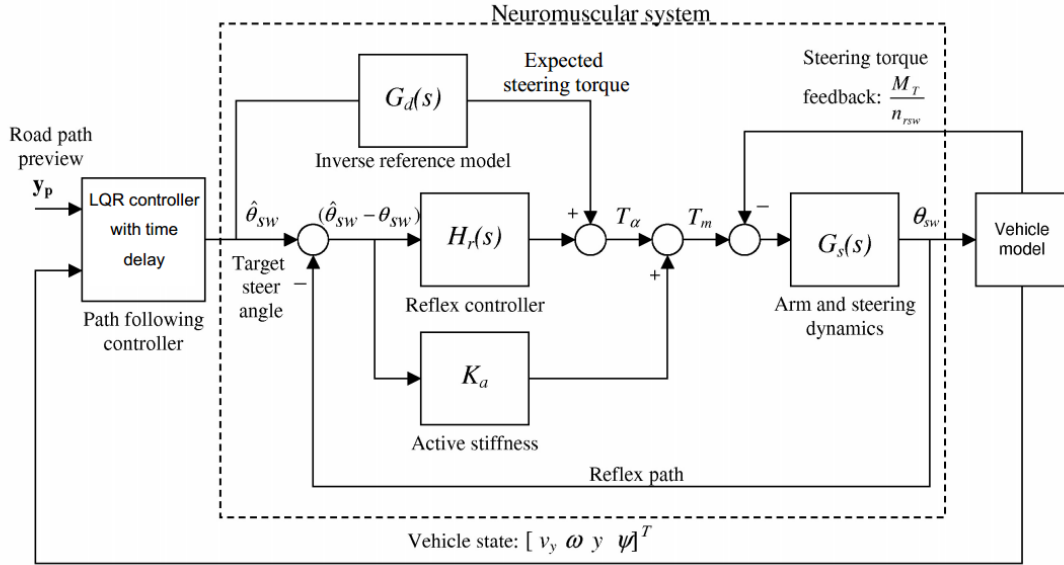
## مقدمة

### 1.1 مقدمة

يوجد في الأدبيات العديد من الاعمال لإيجاد نموذج لفهم طريقة قيادة السائق للسيارة بهدف تطوير خوارزميات تحكم بالسيارة خلال مرحلة المحاكاة، وبهدف تطوير نظم مساعدة السائق على القيادة DAS Driver Assistance Systems . تم فعلياً تطوير العديد من الأنظمة التي تعمل على مساعدة السائق لقيادة السيارة [1][2] ، ويوجد العديد من الأبحاث أيضاً قيد التطوير مثل Steer by wire systems active front steering systems [1]، و تركز هذه الأعمال على دراسة و تحليل قانون التحكم، ولم تركز كثيراً على السائق بحد ذاته. يختلف سائقوا السيارات من حيث مواصفاتهم الفيزيائية ومهاراتهم في القيادة ، لذلك لابد من أخذ السائق بعين الاعتبار أثناء تصميم أنظمة التحكم الخاصة بالسيارات [3][4][5]، وخصوصاً إذا كانت الأنظمة تعتمد على مشاركة السائق مثل نظام EPAS الذي نهتم بدراسته [6].

### 2.1 الدراسات المرجعية

يعد نظام التوجيه في السيارة أحد أهم مكونات السيارة لأن عمله لا يقتصر على توجيه السيارة فقط بل يعطي السائق معلومات عن الطريق أيضاً. يزيد وزن عتاد السيارة المحمول على العجلات الأمامية العبء على السائق لتوجيه السيارة يدوياً. طور صانعو السيارات أنظمة توجيه تعتمد إما على الأنظمة الهيدروليكية أو على الأنظمة الكهربائية وذلك لتخفيف العزم المقدم من السائق أثناء توجيه السيارة [8][9] . تعتمد أنظمة التوجيه الهيدروليكية Hydraulic Power Steering HPS على مضخة الزيت مناسبة لمساعدة السائق لتدوير المقود. بالمقابل تقدم أنظمة التوجيه الكهربائية Electric Power Steering EPS المساعدة عن طريق محرك كهربائي [8][9]. تستهلك أنظمة التوجيه الكهربائية EPS طاقة أقل مقارنة بأنظمة التوجيه الهيدروليكية HPS كما أنها تعد أخف وزناً وأقل كلفة [8][9]. يعتمد عزم المساعدة الذي

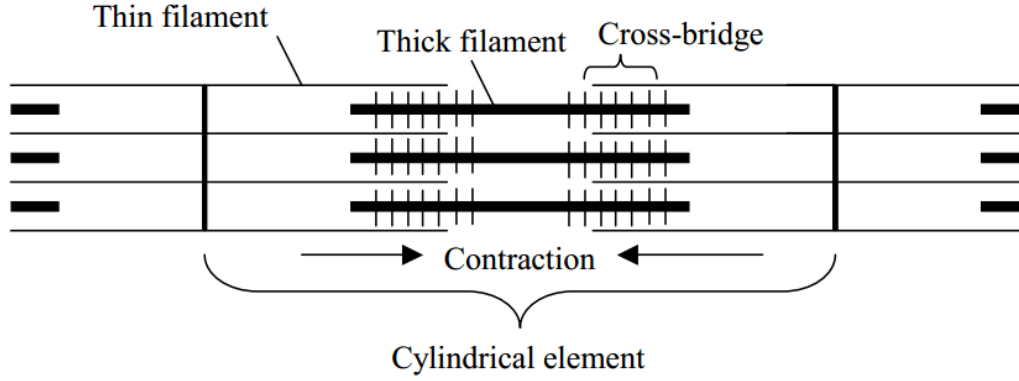


شكل 1.1 : النموذج المقترح من قبل Pick [7] لنمذجة السائق، حيث يقسم إلى قسمين. الأول يمثل CNS بمتحكم أمثلي LQR، والثاني يمثل NMS بعدة متحكمات تقليدية.

تقدمه نظم مساعدة القيادة الكهربائية EPAS على العزم الذي يقدمه السائق [8][9]، بالتالي إيجاد نموذج رياضي لهذا العزم سيساعد على تطوير نظم مساعدة القيادة الكهربائية EPAS. توجد في الأدبيات عدة دراسات عن نمذجة السائق بهدف قيادة السيارات والطائرات [1][10][7]. يمكن تقسيم النموذج المقترح للسائق (Driver Model) إلى قسمين : قسم تحكيمي (Control part) يمثل النظام العصبي المركزي CNS Central Nervous System وقسم عضلي - عصبي (NMS Neuromuscular System)، مثل نموذج السائق المقترح من قبل Pick [7] (شكل 1.1) والذي قام بنمذجة NMS بتوابع تحويل ثابتة مبنية على خواص العضلات، وقام بتصميم متحكم أمثلي لنمذجة CNS.

### 1.2.1 آلية عمل العضلات

المستوى الماكروي يوجد عدة أبحاث لنمذجة الذراع البشرية وفهم آلية عمل العضلات و NMS واستخلاص الخواص الميكانيكية لها. قام Pick [7] بتلخيص أهم الدراسات المتعلقة بنمذجة السائق. فتعتبر العضلات المحرك الأساسي للجهاز العضلي - العصبي وتؤمن القوة اللازمة لتحريك الذراع حول المفاصل. وتتألف كل عضلة من آلاف الألياف العضلية، وترتص الألياف العضلية فوق بعضها البعض بشكل متوازي. وتحرك كل عضلة عن طريق المئات من العصبونات المحركة الكبيرة، والتي تتواجد خلاياها ضمن مجتمعات في النخاع الشوكي، وتعرف هذه العصبونات المحركة بعصبونات ألفا AM Alpha Motors. تقوم عصبونات ألفا المحركة بالتحكم المباشر بتقلص العضلات MC Muscle Contraction. وكل عصبون ألفا مسؤول عن مئة إلى ألف ليف عضلي، وتسمى كل مجموعة تضم الألياف

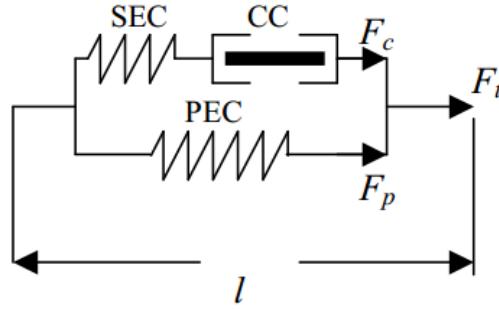


شكل 2.1 : نموذج الألياف المنزقة المقترح من قبل Huxley [12] ، ويوضح الشكل توضع كل من الألياف الناعمة Thin filament والألياف الشخينة Thick filament في العناصر الأسطوانية CE وموضع الجسور العرضية Cross-bridge كما يوضح اتجاه التقلص Contraction في العناصر الأسطوانية Cylindrical element .

العضلية وعصبون ألفا بوحدة محركة MU Motor Unite . يؤدي تفعيل عصبون ألفا إلى التقلص المتعاقب للألياف العضلية ضمن نفس الوحدة [11] . بهذه الطريقة يقوم النخاع الشوكي بضبط آلية توليد القوة المسؤولة عن التقلص.

**المستوى الميكروي** على المستوى الميكروي يتكون كل ليف عضلي من العديد من العناصر الطولية. تتألف العناصر الطولية من العديد من الأجزاء الأسطوانية المتتالية والتي تضم الألياف الشخينة و الناعمة. تعد الأجزاء الأسطوانية Cylindrical Element CE مسؤولة عن خواص التقلص في العضلة. أثناء عملية التقلص تشد الألياف الشخينة مع الألياف الناعمة مع بعضها البعض عبر الجسور العرضية وهي أساس توليد القوة ، وقام Huxley [12] بوضع نموذج للألياف المنزقة [13]. (شكل 2.1)

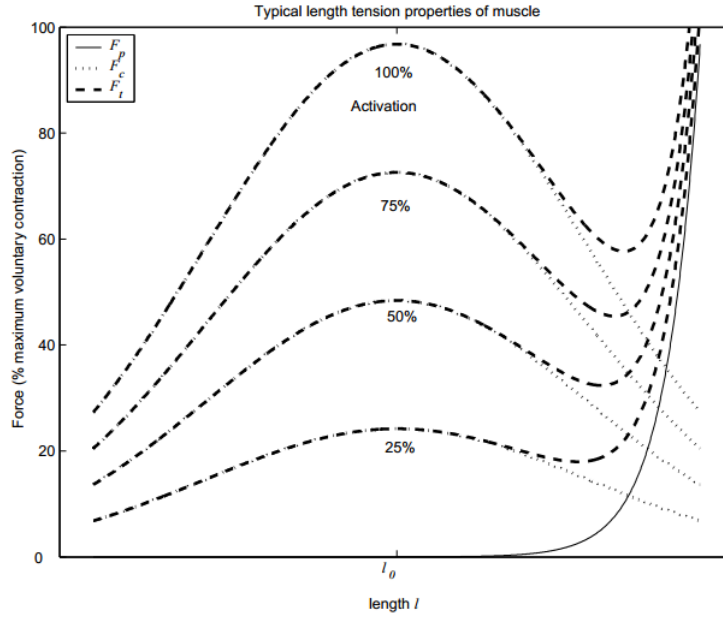
**منشأ صلابة العضلة** نُشرت العديد من الأبحاث التي أظهرت بأن العضلات تمتلك خواص لاختطية، ويوضح نموذج الألياف المنزقة المقترح من قبل Huxley بعض هذه الخواص اللاخطية للعضلات [14] . عندما تكون العضلة غير فعالة (وضع الراحة) تتحرك الألياف الناعمة فوق الشخينة بحرية تكون صلابة العضلة الحقيقية Intrinsic Stiffness منخفضة. أما عندما تتطلب شروط البيئة المحيطة تقلص العضلة عندها تتفعل الوحدات المحركة MU لتولد التقلص وتمنع الإنزلاق بين الألياف الناعمة والشخينة. وربما يولد هذا التقلص صلابة موضعية في الألياف العضلية. كلما زاد تفعيل عدد الوحدات المحركة المفعلة كلما زادت صلابة الألياف العضلية المتوازية. ويُعتقد بأن الصلابة الناتجة تتعلق بطول العضلة عند وضع التفعيل وليس بالطول الحر للعضلة.



شكل 3.1 : نموذج Hill المقترح للعضلات والذي يتألف من ثلاث عناصر ، ويوضح اتجاه القوة في كل عنصر من العناصر الثلاث. يمثل SEC حد المرونة للأوتار والأربطة، ويمثل PEC الخواص السالبة للعضلات، ويمثل CC العنصر الفعال المولد للقوة، و ( $l$ ) هو طول العضلة [7].

**التقلص المساعد** تولد العضلات القوة باتجاه واحد عند الشد، لذلك لتوليد عزم موجب وسالب حول المفصل لابد من وجود زوج من العضلات. تسمى العضلة الفعالة في اتجاه الشد Agonist Muscle AgM والعضلة المقاومة في الاتجاه آخر Antagonist Muscle AtM. ويمكن أن تولد العضلة المقاومة قوة وذلك بتفعيل التقلص المساعد MCC Muscle Co-Contraction دون أن تولد عزم معاكس للعزم المولد من قبل العضلة الفعالة في اتجاه الشد. تمتلك خاصية التقلص المساعد القدرة على تغير نقطة عمل العضلة والتي بدورها تقوم بتغير الصلابة الميكانيكية للعضلة حول المفصل. أظهرت الدراسة المقدمة من قبل [15]Hogan. أن زيادة الصلابة بهذه الطريقة تستخدم من أجل التحكم والاستقرار للذراع. ومن الممكن أن تستخدم هذه الخاصية أثناء عملية القيادة ولكن ليس هنالك أبحاث تتعلق بهذا المجال.

**التوصيف الميكانيكي** قام Hill[16] و Wilkie[17] بإيجاد نموذج لتوصيف الخواص الميكانيكية للعضلات مؤلف من ثلاث عناصر، ويوضح (شكل 3.1) هذا النموذج. يتألف النموذج من نابضين لخطيين وعنصر تقلص مولد للقوة. يمثل النابض التفرعي (PEC) خاصية المرونة السالبة في العضلات، بينما يمثل النابض التسلسلي (SEC) والمربوط مع عنصر توليد القوة (CC) الخواص المرنة للأوتار والأربطة في حال كانت العضلة غير فعالة (حالة راحة). يظهر (شكل 4.1) [19] القوة المولدة من العضلة أثناء القيام بعملية شد، حيث تمثل  $F_t, F_p$  القوة السالبة والقوة المولدة من الأوتار (tendon)، بينما تمثل القوة  $F_c$  القوة المولدة من عنصر التقلص (CC) والتي تعتمد على طول العضلة وسرعتها ومستوى تفعيل العضلة المرتبط بالعصبونات المحركة ألفا AM. تتولد قوة التقلص الأعظمية عندما تكون العضلة في طولها الحر (الطول الطبيعي في الجسم). عندما يكون طول العضلة أقصر من طولها الحر تتداخل الألياف الناعمة مع بعضها لتحد توليد القوة. يقل عدد الجسور العرضية الفعالة في الأطوال عدا الطول الحر. يطلق على الشروط التي تكون فيها العضلة تحت تأثير حالة شد مستقرة و تكون بطول ثابت الشروط Isometric. في الشروط الإيزومترية تكون القوة  $F_t$



شكل 4.1 : القوة المولدة من العضلة أثناء القيام بعملية شد، ويوضح تغير القوة في كل عنصر من العناصر الثلاث لنموذج Hill مع تغير طول العضلة وتغير مستوى تفعيل العضلة تحت شروط ايزومترية [19] كما ذكر [7].

متناسبة بشكل خطي مع مستوى إقلاع العصبونات المحركة ألفا، والذي يعتبر بدوره قياس لمستوى تفعيل العضلة MA Muscle Activation [20] بالرغم من أن خواص العضلات الاخطية أظهرت العديد من الأبحاث والتجارب على حركات صغيرة بأن الخواص للاخطية للصلابة والتخميد يمكن نمذجتها بنماذج خطية. وأستخدم نموذج Hill بشكل واسع النطاق باستخدام عناصر خطية وذلك لتمثيل الحالة الديناميكية للجهاز العضلي-العصبي [21] [22] [23]. قام Hill [16] باستنتاج علاقة تربط بين سرعة تقلص العضلة ومقدار الحمل المطبق عليها في حالة التقلص وتُعطى العلاقة

$$(1.1) \quad (P_m + a_m)(v_m + b_m) = a_m \quad : a_m, b_m = const$$

حيث تعبر  $v_m$  عن سرعة تقلص العضلة، و  $P_m$  الحمل المطبق على العضلة،  $a_m, b_m$  ثوابت. وقام Mashima [25] بتوسيع العلاقة لحالة التمدد [26].

### 2.2.1 دراسات وأبحاث لفهم آلية عمل ذراع الإنسان

أجريت العديد من الأبحاث وذلك بهدف كشف سلوك اليد أثناء الحركة وبهدف معرفة المسار الذي تتبعه اليد للوصول إلى نقطة معينة. فمجموعة العضلات التي تقوم بتوليد حركة الذراع تقاوم مباشرةً أي قوى تحاول تغير مسارها (اضطراب خارجي مفروض) أثناء محاولتها الوصول لهدف معين [28]. أظهر Bennett [28] وزملاؤه أن معرفة الطريقة التي تتبعها اليد أثناء محاولتها الوصول لهدف معين تحت اضطراب مفاجئ تتطلب طرق لنمذجة الأنظمة المتغيرة مع الزمن [24] [30] [31].



قام Hogan[32] باقتراح معيار Minimum-Jerk Motion MJM كتابع لكلفة لمحاولة كشف المسار الأمثلي الذي تتبعه اليد أثناء الوصول لهدف معين، قام بدراسة الساعد (elbow) على أنها جملة درجة ثانية بدرجة حرية واحدة في مستوى أفقي، قام بإجراء اختبارات لكشف سلوك المعيار وأعطى المعيار نتائج جيدة، فكان النموذج قادر على التنبؤ بالمسار المستقيم الذي تسلكه اليد أثناء حركتها غير المقيدة للوصول إلى الأشياء، كما كان قادراً على التنبؤ بالشكل الجرصي (ball-shape) لتتابع سرعة اليد والذي كان توصل إليه كل من Abend[33] و Morasso[34] كما ذكر في [35]، كما أعطى نتائج توصيف للمسارات المنحنية أثناء إدخال نقاط وسطية لمسار اليد، وأظهرت النتائج أن المسار الناتج عن المعيار لا يعتمد على المتحولات الديناميكية للذراع. [29].

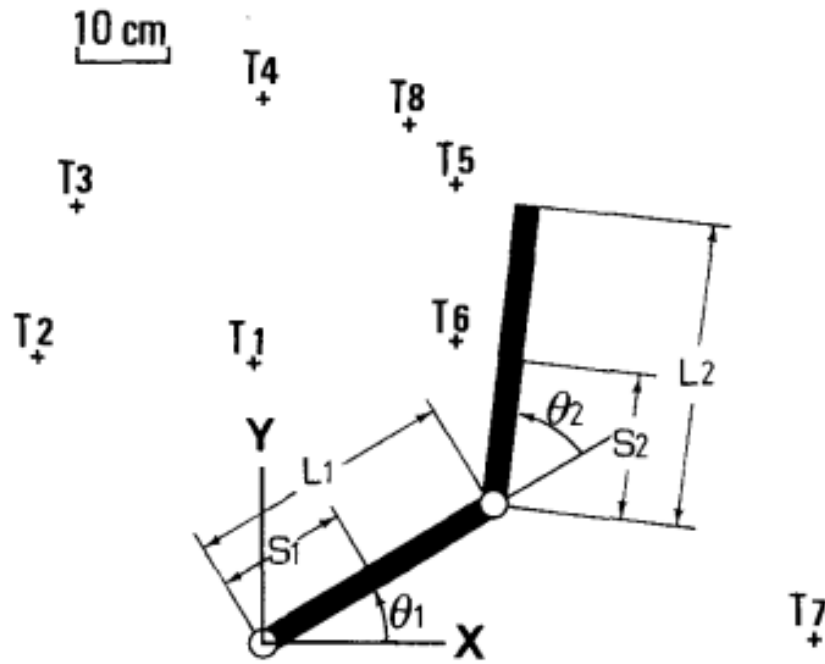
قام Uno وزملاؤه [29] باقتراح معيار آخر Minimum Torque-Change MTC والذي يقوم على تصغير مجموع العزوم المقدمة من العضلات على كامل مسار الحركة. فقام بدراسة الذراع على أنها مكونة من درجتين حرية (ذراع روبوتية) في مستوى أفقي، الأولى عند المفصل الكتفي العضدي (مفصل الكتف) والثانية عند المرفق بين الساعد والعضد (upper arm and elbow). يبين (شكل 5.1) النموذج المستخدم لمطابقة حركة اليد. وقام Uno باختبار سلوك المسار الناتج عن المعيار MTC ومقارنتها مع سلوك المسار الناتج عن المعيار MJM، فكان معيار MTC أيضاً قادراً على التنبؤ بالمسار المستقيم والشكل الجرصي لتتابع السرعة اليد. كما أنه أيضاً تفوق على معيار MJM في عدة اختبارات وكشفت التجارب عن أهمية الأخذ بعين الاعتبار للمتحولات الديناميكية لليد.

قام Ohta وزملاؤه [35] باقتراح معيار مشترك يربط المعيارين Minimum Hand Force Change MHFC و Force Change MMFC و Minimum Muscle Force Change وذلك بغية دراسة المسار الأمثلي الذي تولده اليد أثناء الوصول من نقطة لنقطة أخرى ضمن حركة مقيدة، وقام باختبار أداء المعيار المركب وإجراء اختبارات على حركة اليد على جهاز دوران الساعد المرفقي (Crank-Rotation) وقياس EMG أثناء الحركة و يظهر (شكل 6.1) كيفية النمذجة. كما قام بدراسة الذراع بدرجتين حرية ضمن المستوى الأفقي .

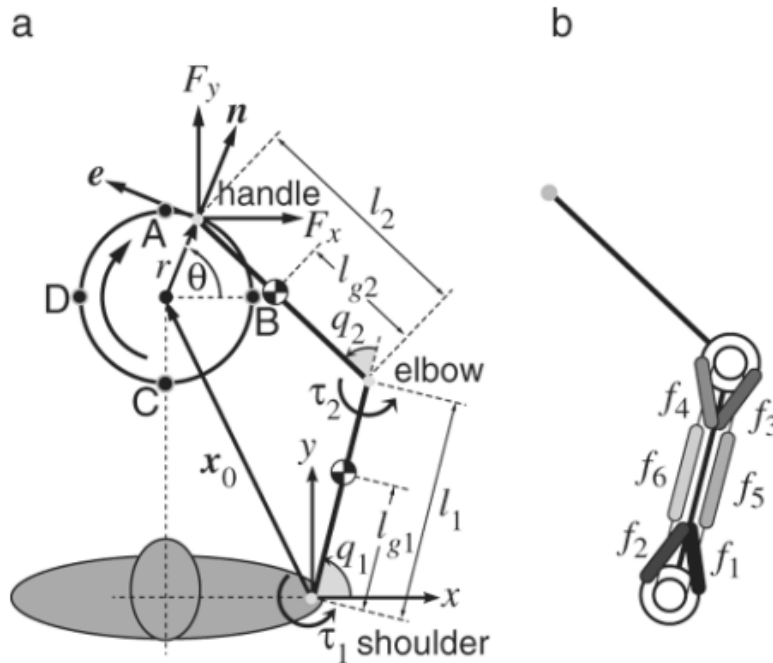
قام Kashima[26] باقتراح معيار RME Reduce Metabolic Energy وذلك بهدف الكشف عن المسار الأمثلي الذي تسلكه اليد أثناء الوصول لنقطة معينة، وقام ببناء نموذج للذراع يعتمد على النموذج العضلي العصبي لليد المقترح من قبل Hill [16]، كما قام بدراسة حركة اليد في المستوى الشاقولي وقام باعتبارها بدرجتين حرية (شكل 7.1)، وقام بإجراء اختبارات أثناء حركة اليد في وضعية الراحة وأثناء تعرضها لقوة معينة (تحمل وزن معين).

### 3.2.1 دراسات وأبحاث لنمذجة الجهاز العصبي المركزي

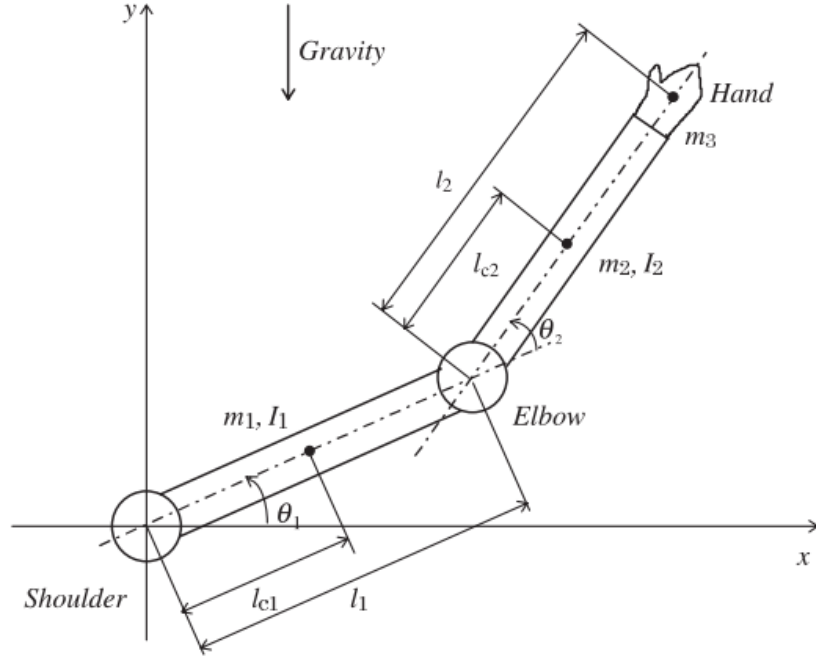
جرت العديد من الأبحاث لمحاولة نمذجة القسم التحكمي والذي يمثل الجهاز العصبي المركزي CNS، فتم تمثيله في بعض الدراسات الأولى عبر compensatory control [36] [37] McRuer، ومن ثم بدأت الدراسات بتمثيله بمصححات أمثلية LQR [7] [38] ومصححات تنبؤية



شكل 5.1 : نموذج الذراع المستخدم من قبل Uno ، حيث يبين تمثيل الذراع بدرجتين حرة دورانيتين وبالمستوي الأفقي، كما يوضح النقاط المستخدمة أثناء القيام بالاختبارات [29].



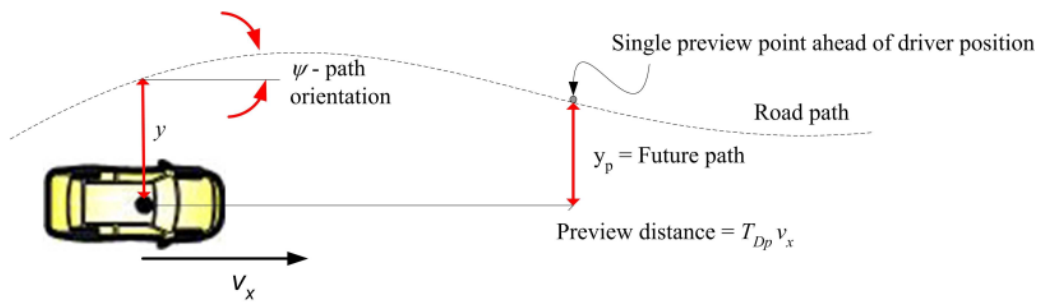
شكل 6.1 : نموذج الذراع المستخدم في الدراسة من قبل Ohta ، ويوضح الشكل b مكان توضع الحساسات على عضلات اليد أثناء إجراء التجارب، ويوضح الشكل a كيفية توضع الذراع بالنسبة لنموذج Crank-Rotation المقترح [35] ، ويوضح نمذجة الذراع بدرجتين حرة وبالمستوي الأفقي .



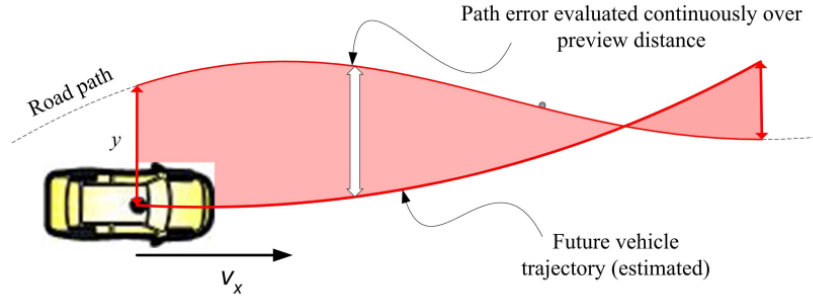
شكل 7.1 : النموذج المستخدم من قبل Kashima لدراسة حركة الذراع، يوضح نموذج الذراع بدرجتي حرية وبالمستوي الشاقولي أخذاً بعين الاعتبار تأثير الجاذبية على حركة الذراع [26].

MPC [39] تستفيد من قدرة السائق على مشاهدة الطريق Preview Control فاقترحت بعض النماذج التي تعتمد على نقطة مشاهدة واحدة ثم تلتها النماذج التي تعتمد على المشاهدة المستمرة [40] [41] ومن ثم النماذج التي تستخدم الزمن المتقطع [42]. وقام كل من Pick[7] و Keen[39] بتلخيص أهم الدراسات حول هذا الموضوع وسنعرض بعض هذه الدراسات .

**نقطة مشاهدة** قام Guan و Guo [43] بتلخيص النماذج التي تعتمد على نقطة مشاهدة واحدة ويوضح (شكل 8.1) رسم تمثيلي لآلية عمل النموذج.



شكل 8.1 : رسم تمثيلي بسيط يوضح مبدأ عمل النماذج التي تعتمد على نقطة مشاهدة واحدة. حيث يقوم السائق بتطبيق التحكم المناسب بالاعتماد على مقارنة الخطأ المستقبلي بين مسار الطريق و الموضع المستقبلي المتوقع للسيارة [39].



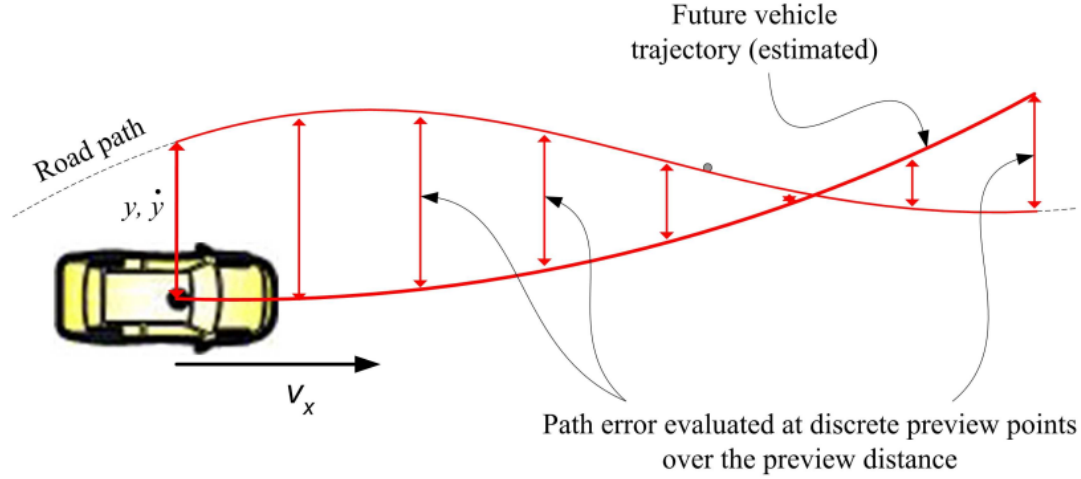
شكل 9.1 : مبدأ المتحكم الأمثلي المستخدم من قبل MacAdams والذي يعتمد على المشاهدة المستمرة ، حيث يعتمد المصحح على الحساب الدائم للخطأ بين مسار السيارة المستقبلي المتوقع ومسار الطريق ومن ثم تطبيق التحكم المناسب (زاوية المقود steering) [39].

**المشاهدة بالزمن المستمر** كان MacAdams [41] أول من قام باقتراح استخدام نماذج المشاهدة كنموذج للسائق المرابط بمهمة التوجيه، حيث قام بتوليد خوارزمية للتحكم الأمثلي بالأنظمة الخطية مبنية على الرؤية . واستخدمت هذه الخوارزمية لنمذجة عملية المشاهدة [44] ، حيث قام باستخدام الرؤية لتوليد مسار خطي أمثلي، وذلك بتوليد سلسلة ربح للمشاهدة من خلال الحل المستمر لتابع الكلفة الذي يصغر بدوره الخطأ المستقبلي بين الطريق ومسار السيارة، كما هو مبين في (شكل 9.1). . يعتبر نموذج MacAdams حالة خاصة من نموذج التحكم التوقعي [45].

على الرغم من أن خوارزمية الأمثلة التي اقترحها MacAdams تعتمد على مقارنة دائمة بين المسار المُشاهد و المسار المتوقع، لكنها يمكن أن تنفذ بشكل أسهل في الزمن المتقطع. يمكن أن تستخدم الخوارزمية في الزمن المتقطع باستخدام نقطة مشاهدة واحدة إذا تم تثقيف النقاط بتابع دلتا-ديراك [44] ، في هذه الحالة تم استخلاص بعض الصفات التي توقعها Weir و McRuer [46] في نموذج cross-over الذي يستخدم مصحح فرق الطور. إن زيادة زمن المشاهدة في متحكم MacAdams يؤدي لقيام السائق بإهمال الزوايا (cutting corner) ، أما بالنسبة لنموذج Weir و McRuer فيؤدي زيادة زمن المشاهدة إلى البدء المفاجئ للمناورة. وتم دراسة زمن المشاهدة من قبل Tousi [47] حيث بين أنه بتقليل زمن المشاهدة تقل المسافة والتي تؤدي بدورها إلى عدم الاستقرار.

قام Ungoren [40] باستخدام التحكم التنبؤي MPC لنمذجة مهمة التوجيه بالاعتماد على متحكم MacAdams ، حيث قام بتثقيف كلاً من خطأ المسار  $y$  ومشتق خطأ المسار  $\dot{y}$  في تابع الكلفة، وتم مقارنة سلوك المتحكم مع نتائج اختبارات عملية مقاسة باستخدام محاكي قيادة. على أي حال لم يأخذ المتحكم الضجيج بعين الاعتبار. وقامت الدراسة بعرض صلاحية استخدام تثقيف  $y, \dot{y}$  في تابع الكلفة بدلا من  $y$  كما فعل MacAdams.

**المشاهدة بالزمن المتقطع** قام Sharp [48] ببناء نموذج للسائق، حيث يقوم السائق بالتصرف بناءً على متحكم أمثلي. يتم تنفيذ التحكم باستخدام متحكم LQR مع إرفاق المسار المشاهد.



شكل 10.1 : مبدأ المتحكم الأمثلي المستخدم من قبل Sharp والذي يعتمد على المشاهدة بالزمن المتقطع، حيث يقوم السائق بالاعتماد على خطأ مسار الطريق ومشتق خطأ المسار لتطبيق التحكم المناسب، يعتبر التحكم ثابت خلال المجال الزمني الواحد [39].

يعطي الحل سلسلة ربح للمشاهدة والتي تُجمع لمتحولات الحالة الراجعة للسيارة لتشكيل دخل تحكم أمثلي وهو زاوية المقود steering angle ، يقوم متحكم التغذية الراجعة باختيار التحكم الأمثل والمقيد بتابع كلفة مبني على طريق السيارة وعلى خطأ زاوية الرأس ودخل التحكم. ومن الجدير بالذكر بأنه ليس من الضروري تحديد زمن مشاهدة في متحكم Sharp الأمثلي أو مسافة مشاهدة لأن القيمة تكون موروثة من نقاط المسار نفسه، كما أن جميع نقاط المسار تأخذ تثقيلاً أصغر من تثقيل دخل التحكم. بالرغم من أن المتحكم LQR مبني على نموذج خطي لكن باختيار مناسب للتثقيل في تابع الكلفة يمكن تحقيق تحكم جيد للنموذج اللاخطي . تم تطوير المتحكم ليضع قيود على دخل التحكم وتحسين التحكم اللاخطي [42]، ومن الجدير بالذكر أن المتحكم تم تصميمه بالزمن المتقطع على عكس MacAdmas والذي يعد تطبيقه أسهل على المتحكمات والمحاكيات الرقمية ويبين (شكل 10.1) توضيح للنموذج، اختار Sharp خطأ المسار  $y$  وزاوية الرأس  $\psi$  كمتحولات لتابع كلفة. ووسع Sharp [49] العمل حيث أظهر أن سلوك المتحكم مستقل عن مجموعة تغيرات الطريق إذا كان طول مسافة المشاهدة يسمح لربح المشاهدة بالاستقرار عند الصفر .

كلا النموذجين المقترحين من قبل MacAdams و Sharp يمكن مقارنته بنموذج Weir و McRuer [46] ذو الحلقات المتعددة، لأن متحولات الحالة الراجعة تتكون من الموضع العرضي وزاوية الرأس والسرع المرتبطة بهما والتي تطبق تصحيح تقديم طور لكل من الموضع والزاوية، وتثقيل الربح على مسار الطريق نمط من أنماط التحكم القادر على التعلم أو ذو الخبرة Precognitive وهو التحكم في الحلقة المفتوحة والذي يركز على خبرة سابقة، لذلك لاتعطي أهمية كبيرة للتغذية الراجعة المرئية.

## الهدف من البحث

يهدف البحث إلى تطوير نموذج رياضي لذراع السائق قادر على التنبؤ بالعزم الذي يجب أن يقدمه السائق لكي تقوم السيارة بالمسار المرغوب، وإلى تقدير الخواص المرنة اللزجة لذراع السائق باستخدام النموذج المقترح.

## الفصل 2

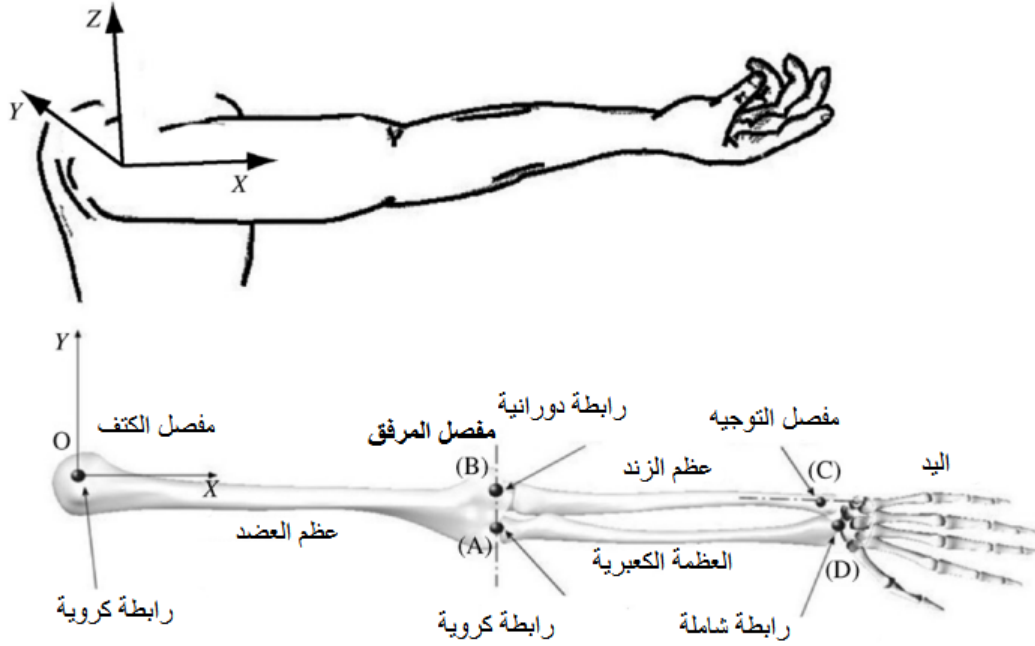
# تطوير نموذج رياضي لذراع السائق

### 1.2 مقدمة

نهدف في هذا الفصل إلى إيجاد نموذج رياضي للعزم الذي يجب أن يقدمه السائق لتوجيه السيارة وفق مسار معين. ينجم عن توجيه السيارة وفق مسار معين قوة تعاكس جهة تغير المقود، ولذلك يقوم السائق بتوليد عزم مناسب لإتمام عملية توجيه السيارة وفق المسار المرغوب. يقوم جسم الإنسان بتأمين العزم المطلوب بتكامل عمل عدد من الأجهزة الوظيفية، حيث يقوم الجهاز العصبي المركزي CNS باستقبال المعلومات من العينين والأجهزة الحسية الموجودة في أطراف الأصابع واليد ويولد الأوامر المناسبة للتحكم بالجهاز العصبي العضلي NMS للوصول للعزم المطلوب. يمكن أن يستخدم السائق إحدى الذراعين أو كليهما في عملية القيادة.

**توظيف مبادئ الأذرع الآلية** يمكن الاستفادة من نظريات الأذرع الآلية لإيجاد نموذج رياضي لعزم السائق، حيث يمكن نمذجة ذراع السائق بذراع آلي ذي عدة درجات حرية. تمتلك الذراع البشرية الكثير من درجات الحرية أي أنها تمتلك فائض من درجات الحرية تُستخدم في تنفيذ المهام المختلفة بعدة مستويات خبرة مختلفة، يزداد تعقيد النموذج الرياضي بازدياد عدد درجات الحرية المستخدمة في النموذج. لذلك من المفيد العمل على إيجاد أقل عدد ممكن من درجات الحرية المستخدمة في عملية القيادة بالتحديد. لإيجاد أقل عدد ممكن من درجات الحرية نستفيد من دراسة النموذج الهندسي المباشر لكل نموذج. نفترض في جميع النماذج بأن اليد ثابتة على المقود.

**مفاصل ذراع الإنسان** تحوي ذراع الإنسان على العديد من المفاصل والعضلات، وقبل البدء بالدراسة الرياضية لحركة الذراع لابد من تحديد المفاصل الرئيسية المسؤولة عن الحركة وتوصيفها بشكل ميكانيكي. يقسم الهيكل العظمي للذراع لثلاث عظام رئيسية وهي عظم العضد وعظم الزند والعظمة الكعبرية بالإضافة للعظام الموجودة في اليد. يربط مفصل



شكل 1.2 : مقطع تشريحي لذراع الإنسان وموضع المفاصل والعظام الرئيسية وأنواع الروابط الموجودة بينها .

الكتف بين الكتف وعظم العضد، ويربط مفصل المرفق بين عظم العضد وعظم الزند من جهة وعظم العضد بالعظمة الكعبرية من جهة أخرى. تتيح بنية مفصل الكتف حرية الحركة لعظم العضد في الفضاء ثلاثي الأبعاد، أي أنه يملك ثلاث درجات حرية ويمكن نمذجته برابطة كروية، وكذلك الأمر بالنسبة للرابطة بين عظم العضد والعظمة الكعبرية، أما بالنسبة للرابطة بين عظم العضد وعظم الزند فهي دورانية. بما أن الدراسة تهتم بعملية القيادة وتعتبر أن اليد ثابتة على المقود نهتم بالرابطة الدورانية الموجودة بين عظم العضد وعظم الزند. يبين الشكل (شكل 1.2) مقطع تشريحي لذراع الإنسان وموضع المفاصل والعظام الرئيسية وأنواع الروابط الموجودة بينها.

## 2.2 تعريف المسألة

عادةً ما يستخدم السائق الذراعين في القيادة ولكن معرفة الآلية التي يوزع بها العزم على الذراعين أمر غير بديهي، فمن غير المعقول البدء بدراسة عملية القيادة باستخدام كلتا الذراعين وآلية توليد العزم في الذراع الواحدة غير معلومة. لدراسة عملية القيادة سنعرف عدة متحولات وفرضيات بغية تسهيل عملية الدراسة. يبين الشكل (شكل 2.2) وضعية السائق وتوضع الذراع على المقود والجمل المرجعية والرموز المستخدمة.

(1). نفترض بأن السائق يستند إلى كرسي السيارة وظهره ثابت بحيث تكون مراكز الأكتاف ثابتة أثناء عملية القيادة، نرمز للجمل المرجعية المرتبطة باليد اليمنى  $RF_0$



، ونرمز للمسافة بين الكتفين  $d_s$ .

(2). السائق يجلس بشكل متناظر بالنسبة للمستوي العمودي على المقود وعلى القطعة المستقيمة الواصلة بين مراكز الأكتاف، وبحيث يكون محور المقود يمر من منتصف القطعة المستقيمة الواصلة بين الكتفين ونرمز لبعدهم مستوي المقود ومنتصف القطعة المستقيمة الواصلة بين الكتفين  $d_{ws}$ .

(3). الذراع ثابتة على المقود أثناء عملية القيادة، ونرمز لموضع اليد اليمنى على المقود  $X$ .

(4). موضع اليدين على المقود يختلف من سائق لآخر، ويختلف أثناء عملية القيادة، لذلك نقتصر الدراسة الحالية على حالة الذراع اليمنى.

(5). نعرف الجملة المرتبطة بالمقود  $RF_B$ ، والأشعة الناظمية والمماسية المرتبطة باليد اليمنى  $e_r, n_r$ .

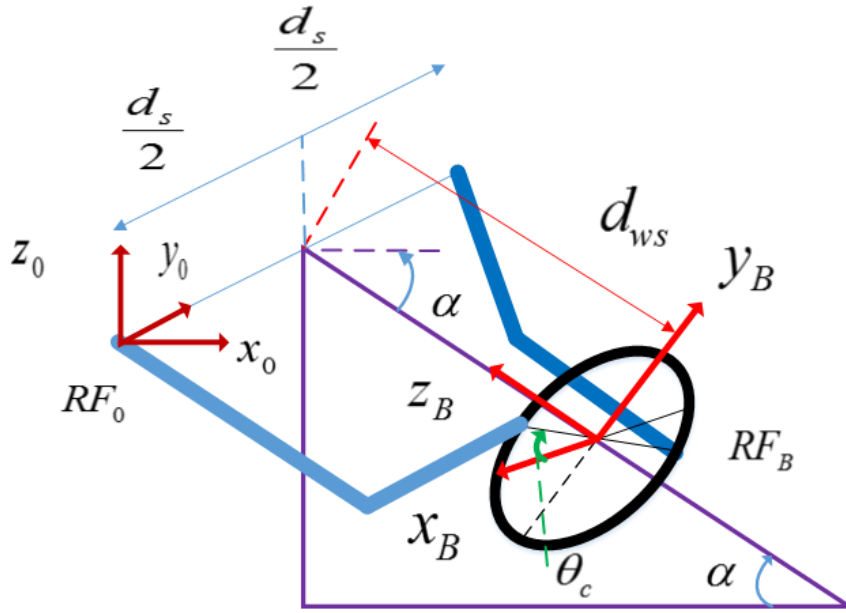
(6). نعرف زاوية دوران المقود  $\theta_c$  بالزاوية بين الشعاع الناظمي  $n_r$  والشعاع  $X_b$  من الجملة المرجعية  $RF_B$ ، ونعرف زاوية ميلان المقود  $\alpha$  بالزاوية بين الشعاع  $Z_B$  والشعاع  $x_0$  من الجملة المرجعية  $RF_0$ ، ونرمز لنصف قطر المقود ب  $r$ .

(7). الاعتماد على المحور الميكانيكي بدلاً من المحور التشريحي لنمذجة أجزاء الذراع وإهمال الزاوية بينهما، حيث يعبر المحور التشريحي عن محور أجزاء الذراع أخذاً بعين الاعتبار شكل العظام وتوضع العضلات، أما المحور الميكانيكي فهو المحور الواصل بين مراكز الدوران. وتُنمذج أجزاء الذراع كأجسام صلبة متناظرة حول محورها الميكانيكي، ويرمز إلى أطوالها  $l_1, l_2$  وأبعاد مراكز العطالة عن مركز محور  $d_1, d_2$ .

تبين الفقرات اللاحقة عدة نماذج ممكنة لذراع السائق وتوضح حدود استخدامها والقيود المفروضة عليها، حيث نبدأ من نموذج درجة حرية واحدة ثم نقوم بزيادة درجات الحرية حتى ثلاث درجات، كما توضح بعض النماذج الرياضية الضرورية للدراسة. تبين الفقرة (6.2) اختبار النموذج في وضع التوازن عن طريق المحاكاة. تبين الفقرة (7.2) تعويض مساهمة تفعيل العضلات عن طريق إضافة متحكم صلد واختبار النموذج الكلي عن طريق المحاكاة. تعرض الفقرة (8.2) التحقق من النموذج عن طريق قياسات عملية مأخوذة من مقلد قيادة.

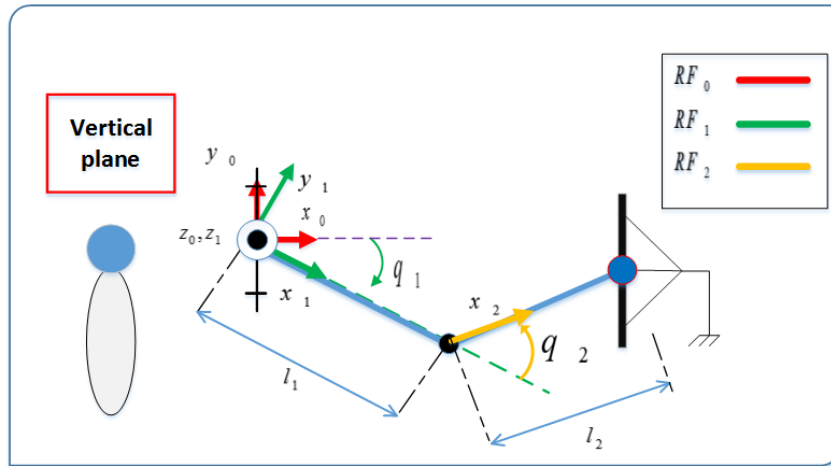
## 3.2 نموذج الذراع بدرجة حرية واحدة

يمكن اعتبار ذراع السائق كذراع آلي بدرجة حرية واحدة، حيث تعتبر الذراع ثابتة عند المرفق بزاوية معينة ولها درجة حرية دورانية وحيدة عند الكتف، ويمكن نمذجتها بعدة

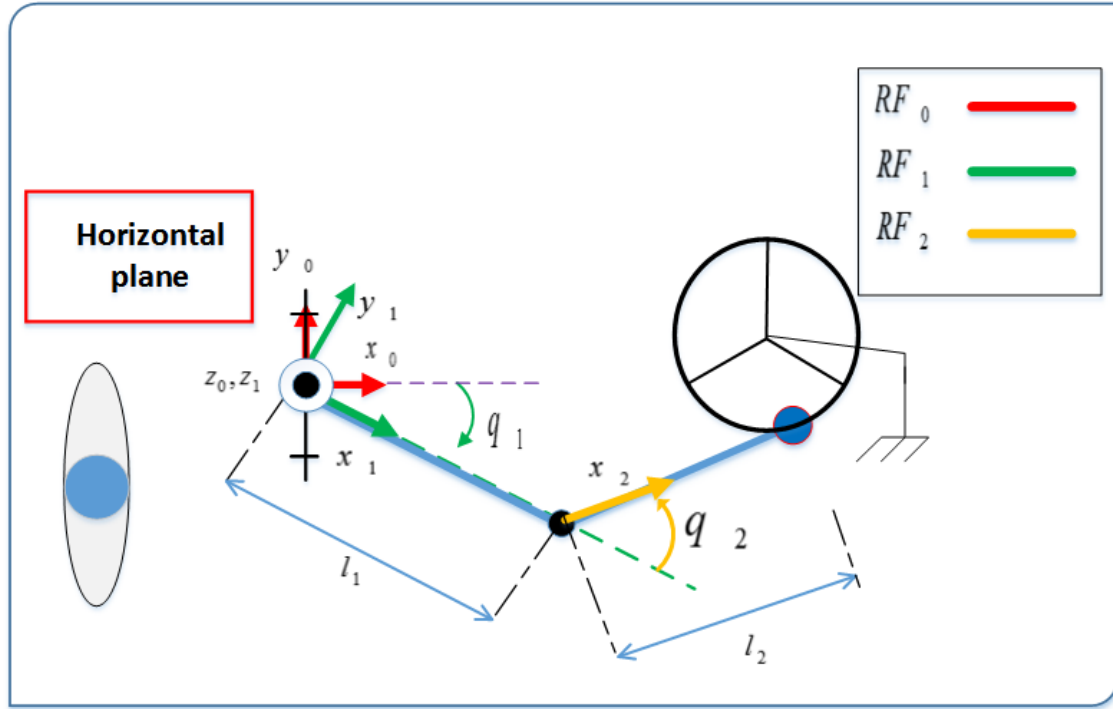


شكل 2.2 : وضعية السائق وتوضع الذراعين والجملة المرجعية  $RF_0$  وجملة المقود  $RF_B$  وزاوية المقود  $\theta_c$ .

أشكال وفقاً لمستوي الحركة، ويشمل المستويين الأفقي والعمودي. يبين الشكل (شكل 3.2) حركة الذراع في المستوي الشاقولي، ويبين الشكل (شكل 4.2) حركة الذراع في المستوي الأفقي. لمعرفة مجال العمل نلجأ لدراسة النموذج الهندسي المباشر لكل النموذجين.



شكل 3.2 : حركة الذراع (درجة حرية واحدة) في المستوي الشاقولي.



شكل 4.2 : حركة الذراع (درجة حرية واحدة) في المستوى الأفقي .

### النموذج الهندسي المباشر

ينتج النموذج الهندسي المباشر لكلا النموذجين بالإسقاط المباشر على جملة الأحداثيات المرجعية  $RF_0$ .

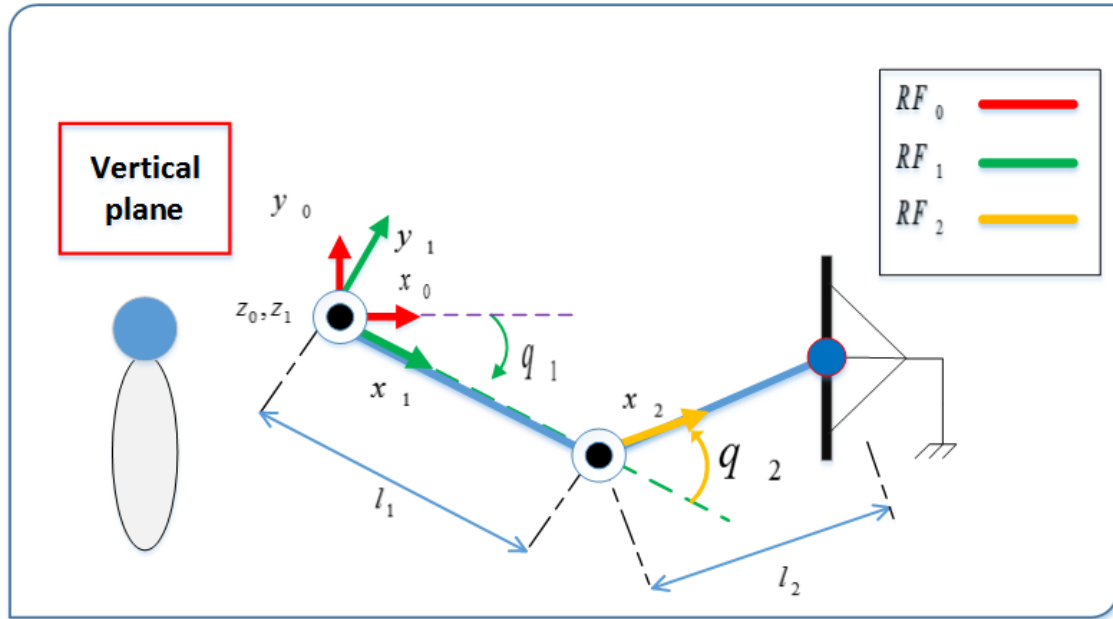
$$(2.1) \quad \begin{aligned} x &= l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_2) \\ y &= l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_2) \end{aligned}$$

باعتبار أن  $q_2$  ثابتة و  $q_1$  درجة حرية دورانية فيمكن للذراع أن تتحرك حركة دائرية بنصف قطر ثابت، أي أن الذراع في كلا النموذجين لا يمكن أن يستخدم لدراسة عملية القيادة ومحاكاة ذراع السائق في الحالة العامة، أما يمكن فقط الاستفادة من كلا النموذجين في تثبيت المقود عند وضعية معينة. لذلك ينبغي زيادة عدد درجات الحرية.

## 4.2 نموذج الذراع بدرجتى حرية

### 1.4.2 نماذج مستوية

يمكن نمذجة ذراع السائق كذراع آلي بدرجتى حرية يعمل في المستوى وفق نموذجين. وهما عبارة عن توسيع فضاء العمل لنموذج درجة الحرية الواحدة عن طريق اعتبار  $q_2$  درجة حرية دورانية، الأول يمكنه الحركة في المستوى الشاقولي، والنموذج الثاني الحركة في

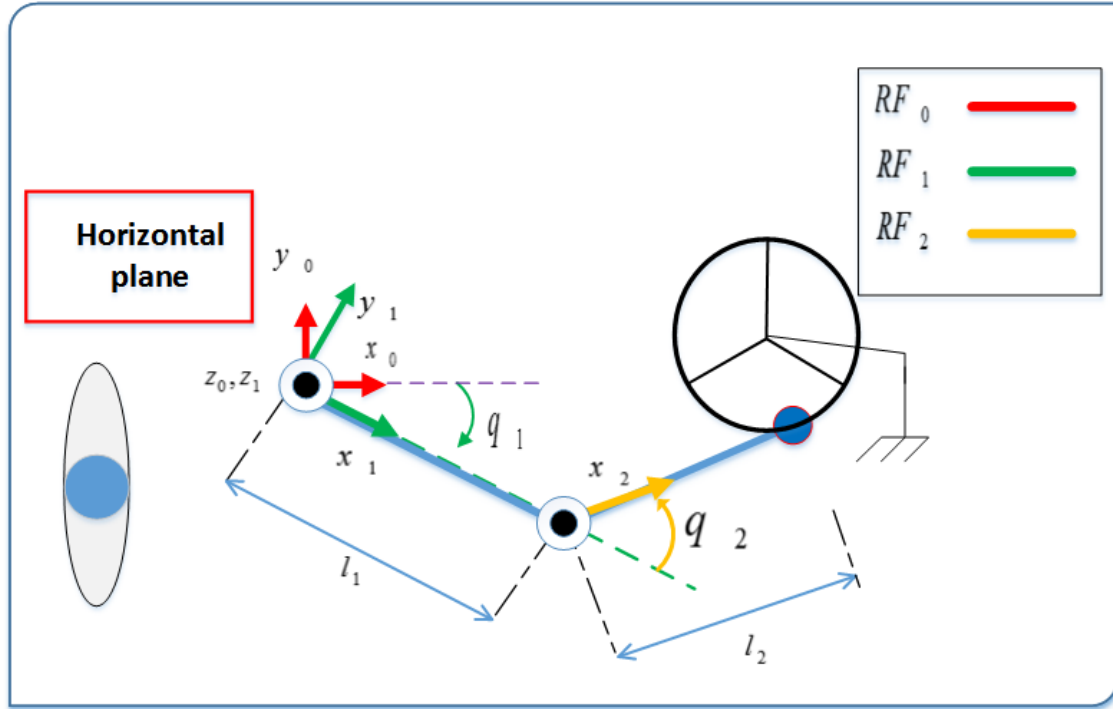


شكل 5.2 : حركة الذراع (درجتى حرية) في المستوي الشاقولي .

المستوي الأفقي. (شكل 5.2) ، ويبين الشكل (شكل 6.2) حركة الذراع في المستوي الأفقي. بالعودة إلى النموذج الهندسي (2.1) مع اعتبار  $q_2$  درجة حرية دورانية نلاحظ بأنه لا يمكن استخدام نموذج درجتى الحرية الذي يعمل بالمستوي الشاقولي إلا في حالة واحدة أيضاً وهي تثبيت المقود عند وضعية معينة. أما في حالة النموذج الذي يعمل في المستوي الأفقي فيتيح فضاء العمل دراسة عملية القيادة في الحالة التي يكون فيها مستوي المقود هو مستوي الحركة نفسه، أما في الحالة التي يكون فيها مستوي المقود مائل بزاوية معينة فلا يمكن استخدام النموذج لدراسة عملية القيادة.

#### 2.4.2 نموذج بثلاث أبعاد

يمكن نمذجة ذراع السائق كذراع آلي بدرجتى حرية يعمل في الفضاء ثلاثي الأبعاد وذلك بجعل محور الرابطة الدورانية عند الكتف يميل بزاوية  $90 \text{ deg}$  عن محور الرابطة الدورانية للمرفق، وبإضافة زاوية ثابتة عند الكتف  $q_2$ ، ويبين الشكل (شكل 7.2) هذا النموذج. على خلاف النموذجين السابقين والذين يعملان في المستوي الأفقي أو الشاقولي يمكن لهذا النموذج العمل في أي مستوي، ويمكنه التحرك في الفضاء ثلاثي الأبعاد، كما يمكن استخدامه لدراسة عملية القيادة في حال وجود زاوية ميلان لمستوي المقود باختيار زاوية  $q_2$  ثابتة مناسبة، أو يمكن تثبيت  $q_3$  عند وضعية معينة واعتبار  $q_2$  هي درجة الحرية الثانية، لكن أظهرت الدراسات التي أجراها Pick [7] على ذراع السائق أثناء عملية القيادة وباستخدام EMG وجود دور فعال للعضلات المسؤولة عن تحريك المرفق أو الكتف في عملية القيادة، لذلك ينبغي زيادة عدد درجات الحرية لتوفير إمكانية دراسة عملية القيادة بطريقة تحاكي قدر الإمكان حركة



شكل 6.2 : حركة الذراع (درجتي حرية) في المستوي الأفقي .

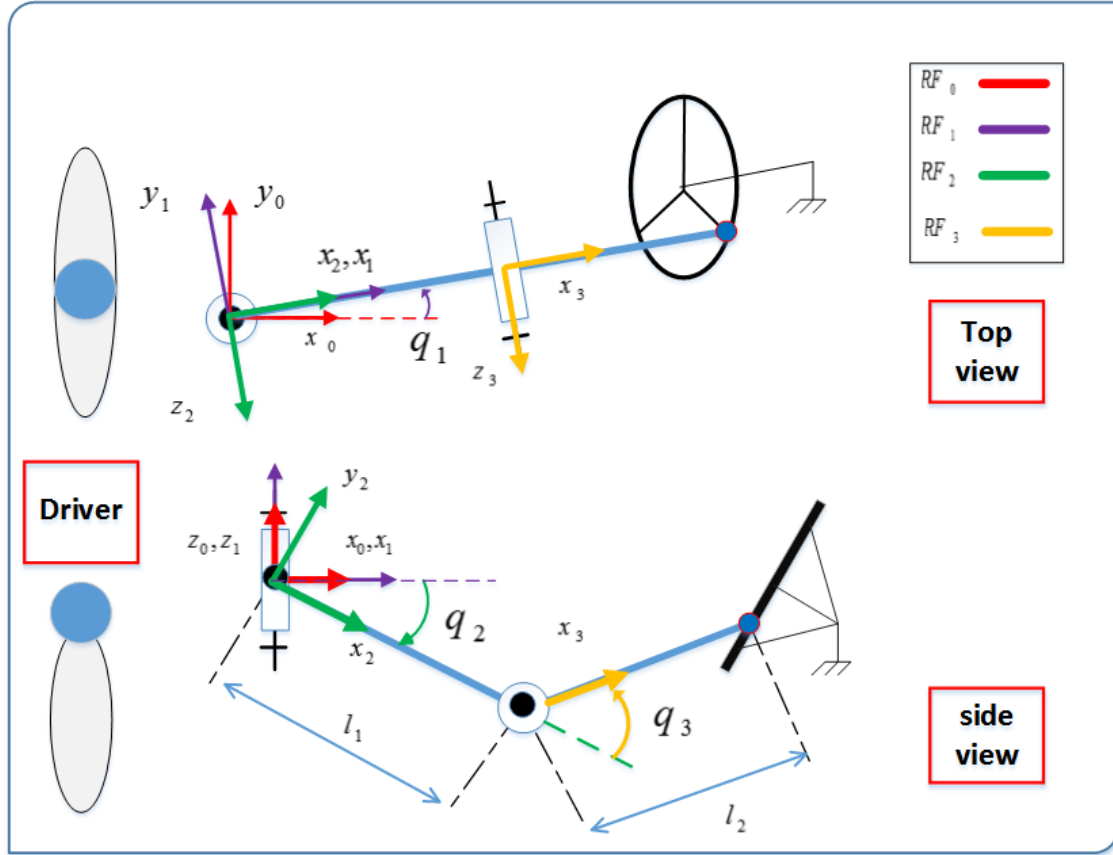
ذراع السائق الحقيقية .

## 5.2 نموذج الذراع بثلاث درجات حرية

يمكن نمذجة ذراع السائق كذراع آلي بثلاث درجات حرية وذلك باعتبار وجود رابطتين دورانيتين متعامدتين عند الكتف ورابطة تالثة عند المرفق. ويبين الشكل (شكل 8.2) توضع الروابط الدورانية والجمال المرجعية المستخدمة لكل رابطة. فمن حيث المبدأ يمكن استخدام هذا النموذج لدراسة عملية القيادة وكيفية الحصول على العزم المطلوب للقيادة، حيث يمكنه الحركة في الفضاء ثلاثي الأبعاد كما يمكن استخدامه في حال تغير أبعاد الذراع. ولإجراء الدراسة الرياضية لعملية القيادة لابد من الأستعانة بالنماذج الرياضية المختلفة المستخدمة لدراسة الأذرع الآلية.

### 1.5.2 النموذج الهندسي المباشر

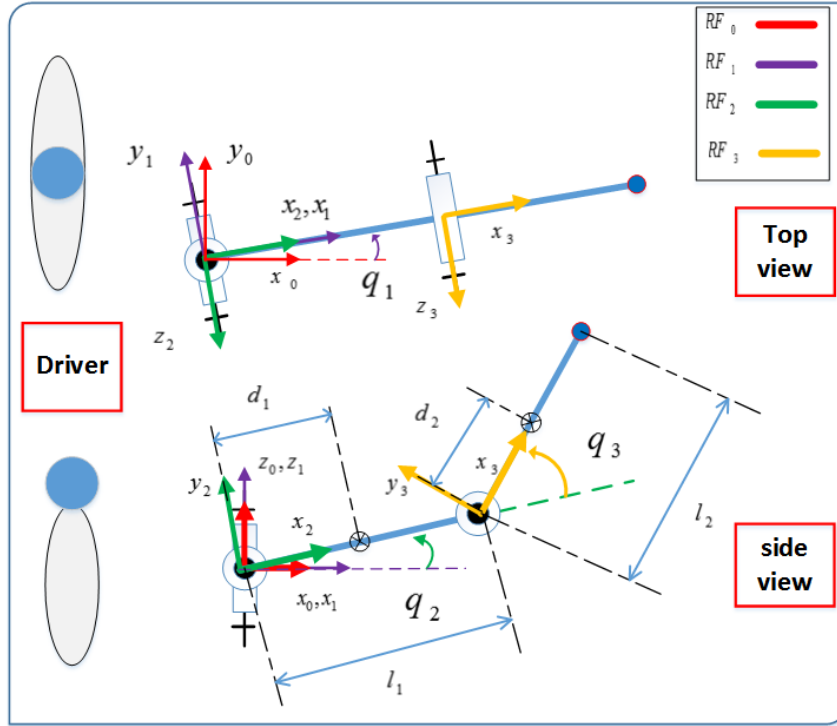
يستخدم النموذج الهندسي المباشر لربط متحولات فضاء العمل (الإحداثيات الديكارتية) بالمتحولات الرباطية (الروابط الدورانية)، يبين الجدول (جدول 1.2) متحولات Denavit-Hartenberg المعدلة المستخدمة لإيجاد هذا النموذج. بالاعتماد على متحولات Denavit-Hartenberg المعدلة توجد التحويلات المتجانسة التي تربط كل جملة بالجملة السابقة ثم



شكل 7.2 : حركة الذراع (درجتي حرية)، حيث يمكن لهذا النموذج الحركة في الفضاء ثلاثي الأبعاد. ويتكون من رابطتين دورائيتين، في هذا الشكل رابطة عند الكتف ورابطة عند المرفق.

جدول 1.2 : متحولات Denavit-Hartenberg المعدلة لذراع السائق

$i$	$\alpha_i$	$d_i$	$a_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$q_1$
2	$\pi/2$	0	0	$q_2$
3	0	$l_1$	0	$q_3$



شكل 8.2 : نموذج الذراع بثلاث درجات حرية ويظهر توضع جمل الروابط الدورانية لذراع السائق وتوضع مركز عطالة أجزاء الذراع..

نوجد التحويل الكلي.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_1 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

يعبر  ${}^jT_i$  التحويل المتجانس الذي ينقل من الجملة (i) إلى جملة أخرى (j)، وتأخذ (i) و (j) احد القيم التالية (i, j = 0, 1, 2, 3) كما نعتمد الرموز التالية

$$c_i = \cos(q_i) \quad : i = 1, 2, 3$$

$$s_i = \sin(q_i) \quad : i = 1, 2, 3$$

ويكون التحويل الكلي

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} c_{23}c_1 & -s_{23}c_1 & s_1 & l_1c_1c_2 \\ c_{23}s_1 & -s_{23}s_1 & -c_1 & l_1c_2s_1 \\ s_{23} & c_{23} & 0 & l_1s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

حيث أن

$$c_{ij} = \cos(q_i + q_j) \quad : i, j = 1, 2, 3$$

$$s_{ij} = \sin(q_i + q_j) \quad : i, j = 1, 2, 3$$

للحصول على النموذج الهندسي المباشر في الإحداثيات المتجانسة نطبق العملية التالية

$$X = {}^0T_3 \times \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 c_{23} c_1 + l_1 c_1 c_2 \\ l_2 c_{23} s_1 + l_1 c_2 s_1 \\ l_2 s_{23} + l_1 s_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

ومنه يكون النموذج الهندسي المباشر  $X$  والمعبر عن موضع اليد في الإحداثيات الديكارطية بالنسبة لمركز الكتف والمبين في (2.2).

$$(2.2) \quad \boxed{X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 c_{23} c_1 + l_1 c_1 c_2 \\ l_2 c_{23} s_1 + l_1 c_2 s_1 \\ l_2 s_{23} + l_1 s_2 \end{bmatrix}}$$

يمكن الوصول إلى موضع اليد على المقود بطريقة ثانية عبر الاستفادة من كل من التحويل الثابت  ${}^0T_B$  بين جملة المقود وجملة الذراع الأساسية والشعاع الناظمي للحركة الدائرية لليد على المقود  $n_r$ ، من الشكل (شكل 2.2).

$$(2.3) \quad X = {}^0T_B r n_r$$

$$(2.4) \quad X_{0B} = \begin{bmatrix} c_\alpha d_{ws} \\ d_s/2 \\ -s_\alpha d_{ws} \end{bmatrix} \quad {}^0R_B = \begin{bmatrix} 0 & s_\alpha & -c_\alpha \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\alpha & s_\alpha \end{bmatrix}$$

حيث أن  $s_\alpha = \sin(\alpha)$  ،  $c_\alpha = \cos(\alpha)$

$$(2.5) \quad {}^0T_B = \begin{bmatrix} {}^0R_B & X_{0B} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

يُستخدم التحويل  ${}^0T_B$  السابقة للإنتقال من الجملة المرتبطة بمستوي المقود  $RF_B$  إلى الجملة الأساسية لذراع  $RF_0$ . أما الإنتقال من الجملة الأساسية  $RF_0$  إلى الجملة المرتبطة بالمقود  $RF_B$  فيكون باستخدام التحويل  ${}^0T_B$ . ويمثل  $X_{0B}$  مركز إحداثيات الجملة  $RF_B$  في الجملة  $RF_0$ ، أما  ${}^0R_B$  فيعبر عن مصفوفة الدوران بين الجملتين  $RF_0$  و  $RF_B$ .

$$(2.6) \quad {}^B T_0 = \begin{bmatrix} {}^0R_B^T & -{}^0R_B^T * X_{0B} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

على عكس الانتقال السابق يحول  ${}^B T_0$  من جملة الذراع  $RF_0$  إلى جملة المقود  $RF_B$ ، ونكتب الشعاع الناظمي  $n_r$  والمماسي  $e_r$  للحركة الدائرية في جملة المقود  $RF_B$  والمبينة



$$(2.7) \quad \mathbf{n}_r = \begin{bmatrix} c_\theta \\ s_\theta \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{e}_r = \begin{bmatrix} -s_\theta \\ c_\theta \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

حيث أن  $s_\theta = \sin(\theta_c)$  ،  $c_\theta = \cos(\theta_c)$

### 2.5.2 النموذج الهندسي العكسي

يربط النموذج الهندسي العكسي المتحولات الرباطية (زوايا المفاصل)  $(q_1, q_2, q_3)$  بالمتحولات العملية (إحداثيات اليد)  $X(x, y, z)$  ، لإيجاد النموذج الهندسي العكسي  $q$  نقوم بحل جملة المعادلات  $\{(2.8), (2.9), (2.10)\}$

$$(2.8) \quad x = l_2 c_{23} c_1 + l_1 c_1 c_2$$

$$(2.9) \quad y = l_2 c_{23} s_1 + l_1 c_2 s_1$$

$$(2.10) \quad z = l_2 s_{23} + l_1 s_2$$

نربع المعادلتين (2.8) ، (2.9) فنحصل على المعادلة

$$x^2 + y^2 = (l_2 c_{23} + l_1 c_2)^2 \Rightarrow l_2 c_{23} + l_1 c_2 = \pm \sqrt{x^2 + y^2}$$

نختار الحل الموجب وذلك حسب طبيعة توضع الجملة بالنسبة لذراع السائق ومنه

$$(2.11) \quad l_2 c_{23} + l_1 c_2 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

نربع ونجمع المعادلتين (2.10) ، (2.11) فنحصل على

$$(2.12) \quad \boxed{c_3 = \frac{x^2 + y^2 + z^2 - (l_1^2 + l_2^2)}{2l_1 l_2} : c_3 \in [-1, 1], \pi > q_3 \geq 0}$$

و

$$(2.13) \quad \boxed{s_3 = \sqrt{1 - c_3}}$$

من (2.12) ، (2.13) وباستخدام الشرط الفيزيائي  $0 \leq q_3 < \pi/2$  يمكن إيجاد  $q_3$  بالعلاقة

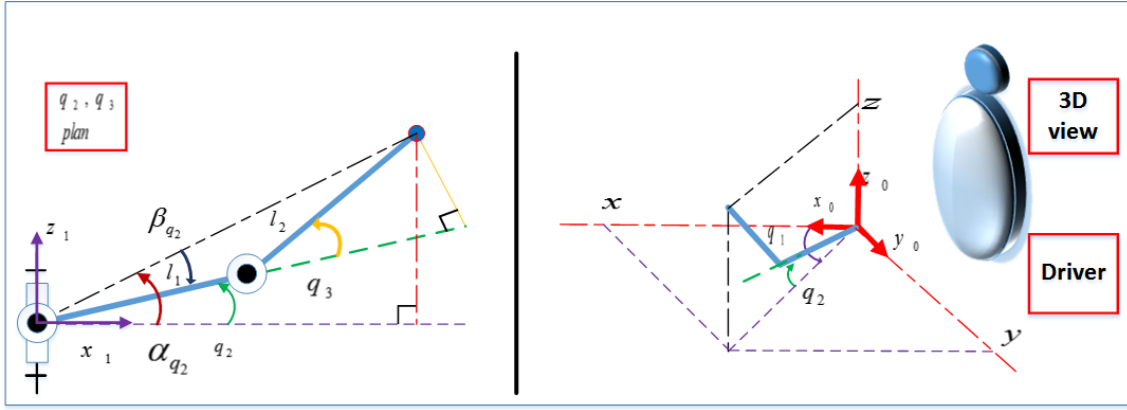
$$(2.14) \quad \boxed{q_3 = \arctan 2(s_3, c_3) : c_3 \in [-1, 1]}$$

لدينا من الشكل (شكل 9.2)

$$q_2 = \alpha_{q_2} - \beta_{q_2}$$

ومن

$$(2.15) \quad \boxed{q_2 = \arctan 2(z, x) - \arctan 2(l_2 s_3, l_1 + l_2 c_3) : x > 0, l_1 + l_2 c_3 > 0}$$



شكل 9.2: توضع الذراع بالنسبة لجملة الأحداثيات المرجعية  $Rf_0$ .

كما لدينا من الشكل

$$(2.16) \quad q_1 = \arctan 2(y, x) : x > 0$$

ومنه يكون النموذج الهندسي العكسي

$$(2.17) \quad \mathbf{q} = \begin{cases} q_1 = \arctan 2(y, x) & : x > 0 \\ q_2 = \arctan 2(z, x) - \arctan 2(l_2 s_3, l_1 + l_2 c_3) & : l_1 + l_2 c_3 > 0 \\ q_3 = \arctan 2(s_3, c_3) & : c_3 \in [-1, 1] \end{cases}$$

### 3.5.2 النموذج التفاضلي

يربط النموذج التفاضلي السرعة العملياتية (سرعة اليد)  $\dot{X}(x, y, z)$  بالسرعة الرابطة  $\dot{q}(q_1, q_2, q_3)$ . نقوم بإشتقاق النموذج الهندسي المباشر  $X$  بالنسبة للمتحويلات الرابطة  $q$  لإيجاد المصفوفة العنقودية  $J$  [50][53]. لدينا

$$(2.18) \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} l_2 c_{23} c_1 + l_1 c_1 c_2 \\ l_2 c_{23} s_1 + l_1 c_2 s_1 \\ l_2 s_{23} + l_1 s_2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{X}(q) = J(q)\dot{q} \quad : \quad J = \frac{\partial X}{\partial q}$$

$$(2.19) \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} -l_2 c_{23} s_1 - l_1 c_2 s_1 & -l_2 s_{23} c_1 - l_1 c_1 s_2 & -l_2 s_{23} c_1 \\ l_2 c_{23} c_1 + l_1 c_1 c_2 & -l_2 s_{23} s_1 - l_1 s_1 s_2 & -l_2 s_{23} s_1 \\ 0 & l_2 c_{23} + l_1 c_2 & l_2 c_{23} \end{bmatrix}$$

### 4.5.2 النموذج التفاضلي العكسي

يربط النموذج التفاضلي العكسي السرعة الرباطية  $\dot{q}$  ( $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3$ ) بالسرعة العملية (سرعة اليد)  $\dot{X}$  ( $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ ) وذلك باستخدام مقلوب المصفوفة اليعقوبية  $J^{-1}$

$$\dot{X}(q) = J(q)\dot{q} \Rightarrow \dot{q} = J(q)^{-1}\dot{X}(q)$$

$$(2.20) \quad J^{-1} = \begin{bmatrix} J_{11}^{-1} & J_{12}^{-1} & J_{13}^{-1} \\ J_{21}^{-1} & J_{22}^{-1} & J_{23}^{-1} \\ J_{31}^{-1} & J_{32}^{-1} & J_{33}^{-1} \end{bmatrix}$$

$$J_{11}^{-1} = -\frac{s_1}{l_2 c_{23} c_1^2 + l_2 c_{23} s_1^2 + l_1 c_1^2 c_2 + l_1 c_2 s_1^2}$$

$$J_{12}^{-1} = \frac{c_1}{l_2 c_{23} c_1^2 + l_2 c_{23} s_1^2 + l_1 c_1^2 c_2 + l_1 c_2 s_1^2}$$

$$J_{13}^{-1} = 0$$

$$J_{21}^{-1} = -\frac{c_{23} c_1}{l_1 c_{23} c_1^2 s_2 - l_1 s_{23} c_1^2 c_2 + l_1 c_{23} s_1^2 s_2 - l_1 s_{23} c_2 s_1^2}$$

$$J_{22}^{-1} = -\frac{c_{23} s_1}{l_1 c_{23} c_1^2 s_2 - l_1 s_{23} c_1^2 c_2 + l_1 c_{23} s_1^2 s_2 - l_1 s_{23} c_2 s_1^2}$$

$$J_{23}^{-1} = -\frac{s_{23}}{l_1 c_{23} s_2 - l_1 s_{23} c_2}$$

$$J_{31}^{-1} = \frac{c_1 (l_2 c_{23} + l_1 c_2)}{l_1 l_2 c_{23} s_1^2 s_2 - l_1 l_2 s_{23} c_2 s_1^2 + l_1 l_2 c_{23} c_1^2 s_2 - l_1 l_2 s_{23} c_1^2 c_2}$$

$$J_{32}^{-1} = \frac{s_1 (l_2 c_{23} + l_1 c_2)}{l_1 l_2 c_{23} s_1^2 s_2 - l_1 l_2 s_{23} c_2 s_1^2 + l_1 l_2 c_{23} c_1^2 s_2 - l_1 l_2 s_{23} c_1^2 c_2}$$

$$J_{33}^{-1} = \frac{l_2 s_{23} + l_1 s_2}{l_1 l_2 c_{23} s_2 - l_1 l_2 s_{23} c_2}$$

$$(2.21) \quad \begin{cases} \dot{q}_1 = J_{11}^{-1} \dot{x} + J_{12}^{-1} \dot{y} \\ \dot{q}_2 = J_{21}^{-1} \dot{x} + J_{22}^{-1} \dot{y} + J_{23}^{-1} \dot{z} \\ \dot{q}_3 = J_{31}^{-1} \dot{x} + J_{32}^{-1} \dot{y} + J_{33}^{-1} \dot{z} \end{cases}$$

أما للحصول على التسارعات الرباطية  $\ddot{q}$  ( $\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ddot{q}_3$ ) والتي تعبر عن التسارعات الزاوية للروابط وعلاقتها بتسارع اليد  $\ddot{X}$  ( $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ ) نشق النموذج التفاضلي المباشر  $\dot{X}$  بالنسبة للزمن [50][53].

$$(2.22) \quad \dot{X}(q) = J(q)\dot{q} \Rightarrow \ddot{X}(q, \dot{q}) = \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} + J(q)\ddot{q}$$

$$(2.23) \quad \ddot{q} = J^{-1}(q) \left[ \ddot{X}(q, \dot{q}) - \dot{J}(q)\dot{q} \right]$$

تعبر المصفوفة  $\dot{J}$  مشتق المصفوفة اليعقوبية بالنسبة للزمن.

$$(2.24) \quad \dot{J}(q) = \frac{\partial J}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial J}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \frac{\partial J}{\partial q_3} \dot{q}_3$$

$$(2.25) \quad \dot{J} = \begin{bmatrix} dJ_{11} & dJ_{12} & dJ_{13} \\ dJ_{21} & dJ_{22} & dJ_{23} \\ dJ_{31} & dJ_{32} & dJ_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} dJ_{11} &= \dot{q}_2(l_2s_{23}s_1 + l_1s_1s_2) - \dot{q}_1(l_2c_{23}c_1 + l_1c_1c_2) + \dot{q}_3l_2s_{23}s_1 \\ dJ_{12} &= \dot{q}_1(l_2s_{23}s_1 + l_1s_1s_2) - \dot{q}_2(l_2c_{23}c_1 + l_1c_1c_2) - \dot{q}_3l_2c_{23}c_1 \\ dJ_{13} &= \dot{q}_1l_2s_{23}s_1 - \dot{q}_3l_2c_{23}c_1 - \dot{q}_2l_2c_{23}c_1 \\ dJ_{21} &= -\dot{q}_1(l_2c_{23}s_1 + l_1c_2s_1) - \dot{q}_2(l_2s_{23}c_1 + l_1c_1s_2) - \dot{q}_3l_2s_{23}c_1 \\ dJ_{22} &= -\dot{q}_1(l_2s_{23}c_1 + l_1c_1s_2) - \dot{q}_2(l_2c_{23}s_1 + l_1c_2s_1) - \dot{q}_3l_2c_{23}s_1 \\ dJ_{23} &= -\dot{q}_1l_2s_{23}c_1 - \dot{q}_2l_2c_{23}s_1 - \dot{q}_3l_2c_{23}s_1 \\ dJ_{31} &= 0 \\ dJ_{32} &= -\dot{q}_2(l_2s_{23} + l_1s_2) - \dot{q}_3l_2s_{23} \\ dJ_{33} &= -\dot{q}_2l_2s_{23} - \dot{q}_3l_2s_{23} \end{aligned}$$

حيث أن

$$\begin{aligned} c_{ijk} &= \cos(q_i + q_j + q_k) & : i, j, k = 1, 2, 3 \\ s_{ijk} &= \sin(q_i + q_j + q_k) & : i, j, k = 1, 2, 3 \end{aligned}$$

$$(2.26) \quad \ddot{q}_1 = \frac{\ddot{y}c_1 - \ddot{x}s_1 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2(l_2s_{23} + l_1s_2) + 2\dot{q}_1\dot{q}_3l_2s_{23}}{l_2c_{23} + l_1c_2}$$

$$(2.27) \quad \ddot{q}_2 = \frac{\cos(q_1 - q_2 - q_3) + c_{123}}{2l_1s_3} \ddot{x} + \frac{\sin(q_1 - q_2 - q_3) + s_{123}}{2l_1s_3} \ddot{y} + \frac{2s_{23}}{2l_1s_3} \ddot{z} + \frac{l_2 + l_2 \cos(2q_2 + 2q_3) + l_1c_3 + l_1 \cos(2q_2 + q_3)}{2l_1s_3} \dot{q}_1^2 + \frac{2l_2 + 2l_1c_3}{2l_1s_3} \dot{q}_2^2 + \frac{l_2}{l_1s_3} \dot{q}_3^2 + \frac{4l_2}{2l_1s_3} \dot{q}_2\dot{q}_3$$

$$(2.28) \quad \ddot{q}_3 = -\frac{l_1c_1c_2 + l_2c_1c_{23}}{l_1l_2s_3} \ddot{x} - \frac{l_1s_2 + l_2s_{23}}{l_1l_2s_3} \ddot{y} - \frac{l_1s_2 + l_2s_{23}}{l_1l_2s_3} \ddot{z} - \frac{l_1^2 + 2c_3l_1l_2 + l_2^2}{l_1l_2s_3} \dot{q}_2^2 - \frac{l_2^2 + l_1c_3l_2}{l_1l_2s_3} \dot{q}_3^2 - 2\frac{l_2^2 + 2l_1c_3l_2}{l_1l_2s_3} \dot{q}_2\dot{q}_3 - \frac{l_1^2c_2^2 + 2l_1l_2c_2^2c_3 - 2s_2s_3l_1l_2c_2 + 2l_2^2c_2^2c_3^2 - l_2^2c_2^2}{l_1l_2s_3} \dot{q}_1^2 - \frac{-2s_2s_3l_2^2c_2c_3 - l_2^2c_3^2 + l_2^2}{l_1l_2s_3} \dot{q}_1^2$$

### 5.5.2 النموذج الديناميكي

تعطى عبارة النموذج الديناميكي لذراع روبوتية بالعلاقة (2.29) [50][53]

$$(2.29) \quad B(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + G(q) = \tau$$

حيث أن  $B$  مصفوفة العطالة،  $c$  شعاع قوى الطرد المركزية وقوة كوريوليس، و  $G$  حد الجاذبية و  $\tau$  شعاع العزوم عند الرباط. لحساب  $B(q)$  تُستخدم عبارة الطاقة الحركية الكلية للذراع  $T$  [50][53] ويمكن حساب  $c$  بالاعتماد على المصفوفة  $B(q)$

$$(2.30) \quad T = \frac{1}{2} \dot{q}^T B(q) \dot{q}$$

ويُحسب  $G$  بالاعتماد على علاقة الطاقة الكامنة الكلية للذراع  $U$ .

### حساب الطاقة الحركية الكلية

تُحسب الطاقة الحركية الكلية للذراع المكون من  $N$  جزء بالعلاقة (2.31) [50][53]

$$(2.31) \quad T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (m_i v_{ci}^T v_{ci} + \omega_i^T I_{ci} \omega_i)$$

حيث أن  $m_i$  كتلة الجزء  $i$  من الذراع  $v_{ci}$  سرعة مركز عطالة الجزء  $i$ ، و  $\omega_i$  السرعة الدورانية للجزء  $i$ ، و  $I_{ci}$  مصفوفة العطالة للجزء  $i$ .

$$v_{ci} = v_i + \omega_i \times r_{ci}$$

حيث أن  $v_i$  سرعة مركز الجملة  $RF_i$  المرتبطة بالجزء  $i$  و  $r_{ci}$  مركز عطالة الجزء  $i$  مكتوب في  $RF_i$  [50][53]. في حالة الروابط الدورانية يمكن كتابة السرعة الخطية والدورانية للجملة  $RF_i$  بدلالة السرعة الخطية والدورانية للجملة  $RF_{i-1}$  [50][53].

$$\begin{aligned} {}^i\omega_i &= {}^{i-1}R_i^T {}^{i-1}\omega_i \\ {}^i v_i &= {}^{i-1}v_i + {}^{i-1}\omega_i \times {}^{i-1}r_{i-1,i} \end{aligned}$$

حيث أن  ${}^i v_i$  سرعة مركز الجملة  $RF_i$  مكتوب في  $RF_i$ ، و  ${}^{i-1}v_i$  سرعة مركز الجملة  $RF_{i-1}$  مكتوب في  $RF_{i-1}$ ، و  ${}^{i-1}r_{i-1,i}$  مركز الجملة  $RF_i$  مكتوب في الجملة  $RF_{i-1}$ ، وكذلك الأمر بالنسبة للسرعة الزاوية  ${}^i\omega_i$  فهي السرعة الزاوية للجزء  $i$  مكتوب في الجملة  $RF_i$ .  ${}^{i-1}R_i$  مصفوفة الدوران بين الجملة  $RF_i$  والجملة  $RF_{i-1}$ .

$$(2.32) \quad \omega_1 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{vmatrix} \quad \omega_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ -\dot{q}_2 \\ 0 \end{vmatrix} \quad \omega_3 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_3 \end{vmatrix}$$

بافتراض أن  ${}^0\omega_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ ،  ${}^0v_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$

$$(2.33) \quad {}^0\omega_1 = ({}^0\omega_0 + \omega_1) = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{vmatrix}$$

$$(2.34) \quad {}^1\omega_2 = ({}^1\omega_1 + \omega_2) = \begin{vmatrix} 0 \\ -\dot{q}_2 \\ \dot{q}_1 \end{vmatrix}$$

$$(2.35) \quad {}^2\omega_3 = ({}^2\omega_2 + \omega_3) = \begin{vmatrix} \dot{q}_1 s_2 \\ \dot{q}_1 c_2 \\ \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \end{vmatrix}$$

$$(2.36) \quad {}^1\omega_1 = {}^0R_1^T ({}^0\omega_1) = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{vmatrix}$$

$$(2.37) \quad {}^2\omega_2 = {}^1R_2^T ({}^1\omega_2) = \begin{vmatrix} \dot{q}_1 s_2 \\ \dot{q}_1 c_2 \\ \dot{q}_2 \end{vmatrix}$$

$$(2.38) \quad {}^3\omega_3 = {}^2R_3^T ({}^2\omega_3) = \begin{vmatrix} \dot{q}_1 s_{23} \\ \dot{q}_1 c_{23} \\ \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \end{vmatrix}$$

$$(2.39) \quad {}^0r_{0,1} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad {}^1r_{1,2} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad {}^2r_{2,3} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \end{vmatrix}$$

$$(2.40) \quad {}^1v_1 = {}^0R_1^T ({}^0v_0 + {}^0\omega_1 \times {}^0r_{0,1}) = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$(2.41) \quad {}^2v_2 = {}^1R_2^T ({}^1v_1 + {}^1\omega_2 \times {}^1r_{1,2}) = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$(2.42) \quad {}^3v_3 = {}^2R_3^T ({}^2v_2 + {}^2\omega_3 \times {}^2r_{2,3}) = \begin{vmatrix} l_1 s_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ l_1 c_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ -\dot{q}_1 l_1 c_2 \end{vmatrix}$$

$$(2.43) \quad {}^2r_{c_1} = \begin{vmatrix} d_1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad {}^3r_{c_2} = \begin{vmatrix} d_2 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

حيث أن  ${}^j r_{c_i}$  مركز عطالة الجزء  $i$  من الذراع مكتوب في الجملة  $RF_j$ .

$$(2.44) \quad {}^2 v_{c_1} = {}^2 v_2 + {}^2 \omega_2 \times {}^2 r_{2,3} = \begin{vmatrix} 0 \\ d_1 \dot{q}_1 \\ -d_1 \dot{q}_1 c_2 \end{vmatrix}$$

$$(2.45) \quad {}^3 v_{c_2} = {}^3 v_3 + {}^3 \omega_3 \times {}^2 r_{2,3} = \begin{vmatrix} l_1 s_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ (\dot{q}_2 + \dot{q}_3)(d_2 + l_1 c_3) \\ -l_1 \dot{q}_1 c_2 - d_2 \dot{q}_1 c_3 \end{vmatrix}$$

بالاعتماد على العلاقة (2.31) نحسب الطاقة الحركية لكل جزء من أجزاء الذراع

$$(2.46) \quad T_1 = m_1 {}^2 v_{c_1}^T {}^2 v_{c_1} + {}^2 \omega_2^T {}^2 I_{c_1} {}^2 \omega_2$$

حيث أن  $I_{c_1}$  هي مصفوفة العطالة الأساسية للجزء (1) من الذراع وهي مصفوفة قطرية

عناصر أقطارها هي عزوم العطالة الرئيسية  $I_{1xx}, I_{1yy}, I_{1zz}$

$$(2.47) \quad T_1 = \frac{1}{2} [((m_1 d_1^2 + I_{1yy})c_2^2 + I_{1xx}s_2^2) \dot{q}_1^2 + (m_1 d_1^2 + I_{1zz})\dot{q}_2^2]$$

$$(2.48) \quad T_2 = m_2 {}^3 v_{c_2}^T {}^3 v_{c_2} + {}^3 \omega_3^T {}^3 I_{c_2} {}^3 \omega_3$$

حيث أن  $I_{c_2}$  هي مصفوفة العطالة الأساسية للجزء (2) من الذراع وهي مصفوفة قطرية

عناصر أقطارها هي عزوم العطالة الرئيسية  $I_{2xx}, I_{2yy}, I_{2zz}$

$$(2.49) \quad T_2 = \frac{1}{2} [m_2 (d_2 c_{23} + l_1 c_2)^2 + I_{2yy} c_{23}^2 + I_{2xx} s_{23}^2] \dot{q}_1^2 \\ + \frac{1}{2} [I_{2zz} + m_2 (l_1^2 s_3^2 + (d_2 + l_1 c_3)^2)] \dot{q}_2^2 \\ + \frac{1}{2} [I_{2zz} + m_2 (l_1^2 s_3^2 + (d_2 + l_1 c_3)^2)] \dot{q}_3^2 \\ + [m_2 (l_1^2 s_3^2 + (d_2 + l_1 c_3)^2) + I_{2zz}] \dot{q}_2 \dot{q}_3$$

فتكون الطاقة الحركية الكلية للذراع  $T$

$$(2.50) \quad T = \frac{1}{2} [m_2 (d_2 c_{23} + l_1 c_2)^2 + I_{2yy} c_{23}^2 + I_{2xx} s_{23}^2 + I_{1yy} c_2^2 + I_{1xx} s_2^2 + d_1^2 m_1 c_2^2] \dot{q}_1^2 \\ + \frac{1}{2} [m_1 d_1^2 + I_{1zz} + I_{2zz} + m_2 (l_1^2 s_3^2 + (d_2 + l_1 c_3)^2)] \dot{q}_2^2 \\ + \frac{1}{2} [I_{2zz} + m_2 (l_1^2 s_3^2 + (d_2 + l_1 c_3)^2)] \dot{q}_3^2 \\ + [m_2 (l_1^2 s_3^2 + (d_2 + l_1 c_3)^2) + I_{2zz}] \dot{q}_2 \dot{q}_3$$

ومنه نقوم بكتابة  $T$  كما في المعادلة (2.30) لحساب مصفوفة العطالة الخاصة بالذراع  $B$ .

$$(2.51) \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}$$

$$B_{11} = m_2(d_2c_{23} + l_1c_2)^2 + I_{2yy}c_{23}^2 + I_{2xx}s_{23}^2 + I_{1yy}c_2^2 + I_{1xx}s_2^2 + d_1^2m_1c_2^2$$

$$B_{22} = m_1d_1^2 + m_2d_2^2 + 2m_2c_3d_2l_1 + m_2l_1^2 + I_{1zz} + I_{2zz}$$

$$B_{33} = m_2d_2^2 + 2m_2c_3d_2l_1 + m_2l_1^2 + I_{2zz}$$

$$B_{32} = B_{23} = m_2d_2^2 + 2m_2c_3d_2l_1 + m_2l_1^2 + I_{2zz}$$

$$B_{12} = B_{21} = 0$$

$$B_{13} = B_{31} = 0$$

بالاعتماد على مصفوفة العطالة نقوم بحساب شعاع قوى كوريوليس وقوى الطرد المركزي [50][53].

$$(2.52) \quad \mathbf{c} = [c_{h1} \quad c_{h2} \quad c_{h3}]^T$$

$$c_{hk} = \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C}_k(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$$

$$\mathbf{C}_k = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mathbf{b}_k}{\partial \mathbf{q}} + \left( \frac{\partial \mathbf{b}_k}{\partial \mathbf{q}} \right)^T - \frac{\partial B}{\partial \mathbf{q}_k} \right)$$

حيث تمثل المركبة  $k$  من الشعاع  $\mathbf{c}$ ، ويمثل  $\mathbf{b}_k$  العمود  $k$  من المصفوفة  $B$

$$(2.53) \quad \begin{aligned} c_{h1} = & -2\dot{q}_1\dot{q}_2 [(I_{1yy} - I_{1xx})c_2s_2 + (I_{2yy} - I_{2xx})c_{23}s_{23} \\ & + m_1c_2s_2d_1^2 + m_2(d_2c_{23} + l_1c_2)(d_2s_{23} + l_1s_2)] \\ & - 2\dot{q}_1\dot{q}_3 [(I_{2yy} - I_{2xx})c_{23}s_{23} + d_2m_2s_{23}(d_2c_{23} + l_1c_2)] \end{aligned}$$

$$(2.54) \quad \begin{aligned} c_{h2} = & \dot{q}_1^2 [(I_{2yy} - I_{2xx})c_{23}s_{23} + (I_{1yy} - I_{1xx})c_2s_2 \\ & + m_1c_2s_2d_1^2 + m_2(d_2c_{23} + l_1c_2)(d_2s_{23} + l_1s_2)] \\ & - 2d_2l_1m_2s_3\dot{q}_3^2 - 2d_2l_1m_2s_3\dot{q}_2\dot{q}_3 \end{aligned}$$

$$(2.55) \quad \begin{aligned} c_{h3} = & \dot{q}_1^2 [(I_{2yy} - I_{2xx})c_{23}s_{23} + d_2m_2s_{23}(d_2c_{23} + l_1c_2)] \\ & + d_2l_1m_2s_3\dot{q}_2^2 - d_2l_1m_2s_3\dot{q}_3^2 \end{aligned}$$

### حساب الطاقة الكامنة

يُكتب شعاع قوى الجاذبية في الجملة المرجعية  $RF_0$

$$\mathbf{g} = [0 \quad 0 \quad -g_0]^T$$

تنتج الطاقة الكامنة الكلية  $U$  للذراع من مجموع الطاقات الكامنة الجزئية لأجزاء الذراع [50][53]

$$U = U_1 + U_2$$

$$(2.56) \quad U_1 = -m_1\mathbf{g}^T \mathbf{r}_{c_1} \Rightarrow m_1g_0d_1s_2$$



$$(2.57) \quad U_2 = -m_2 \mathbf{g}^T \mathbf{r}_{c_2} \Rightarrow m_2 g_0 (d_2 s_{23} + l_1 s_2)$$

بالاعتماد على عبارة الطاقة الكامنة الكلية  $U$  نحسب تأثير قوى الجاذبية على الذراع والممثل بالشعاع  $G$  [50][53]

$$(2.58) \quad G(\mathbf{q}) = \left( \frac{\partial U}{\partial \mathbf{q}} \right)^T = [G_1 \quad G_2 \quad G_3]^T$$

$$(2.59) \quad G(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ g_0 m_2 (d_2 c_{23} + l_1 c_2) + d_1 g_0 m_1 c_2 \\ d_2 g_0 m_2 c_{23} \end{bmatrix}$$

بيناً في هذا القسم كيفية دراسة عملية القيادة والفرصيات والشروط اللازمة لتبسيط عملية الدراسة. وتم دراسة عدة حالات لذراع السائق حيث تختلف فيما بينها بعدد الروابط المستخدمة، ويختلف تصرف النموذج ومجال عمله (المستوي الشاقولي أو الأفقي) تبعاً لعدد الروابط. يمكن أن يستخدم نموذج الرابطة الواحدة في حالة تثبيت المقود عند وضعية معينة وتطبيق عزم تحريض خارجي، بينما يمكن استخدام نموذج درجتي الحرية لدراسة عملية القيادة في المستوي الأفقي فقط. يمتلك نموذج درجات الحرية الثلاث القدرة على محاكاة حركة ذراع السائق في الفضاء ثلاثي الأبعاد.

## 6.2 التحقق من النموذج عن طريق المحاكاة

يأخذ النموذج زاوية المقود المرغوبة ومشتقاتها  $\theta_c$ ،  $\dot{\theta}_c$ ،  $\ddot{\theta}_c$  والقوة الخارجية  $F_{ext}$  المطبقة على الذراع نتيجة وجود اليد على المقود والناجمة عن العزم المقاوم  $T_r$  الناتج عن قوى احتكاك الدواليب بالأرض  $F_{rw}$  والمنقولة إلى المقود. يُضاف تأثير القوة الخارجية إلى النموذج الديناميكي (2.29) فيكون النموذج كما في المعادلة (2.60)، ونستخدم  $\tau_a$  للدلالة على العزم المقدمة من الروابط في حال وجود القوة الخارجية  $F_{ext}$  [50][53]

$$(2.60) \quad B(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + G(\mathbf{q}) = \tau_a - J^T F_{ext}$$

يفرض وجود اليد على المقود بشكل دائم قيود هندسية على النموذج الديناميكي، إذ أن طبيعة حركة الذراع في مستوي المقود هي حركة دائرية، فيحدد موضع اليد على المقود بالنموذج الهندسي المباشر (2.2) من جهة ومن جهة أخرى عبر الشعاع الناظم للحركة الدائرية  $n_r$  وذلك ضمن فرضيات الدراسة (ثبات ظهر السائق على كرسي السيارة واليد ثابتة على المقود) فينشأ القيد الهندسي المبين في المعادلة (2.61).

$$(2.61) \quad X = {}^0T_B r n_r$$

باشتقاق طرفي القيد الهندسي السابق (2.61) نحصل على القيود الديناميكية على  $\dot{\mathbf{q}}$ .

$$(2.62) \quad \dot{X} = {}^0T_B r \dot{\theta}_c e_r$$

بتعويض  $\dot{X}$  من العلاقة (2.22)

$$(2.63) \quad \dot{q} = J^{-1} \left[ {}^0T_B r \dot{\theta}_c e_r \right]$$

باشتقاق طرفي المعادلة (2.62) نحصل على القيود الديناميكية على  $\ddot{q}$ .

$$(2.64) \quad \ddot{X}(q) = {}^0T_B \left[ r \ddot{\theta}_c e_r - r \dot{\theta}_c^2 n_r \right]$$

بتعويض  $\ddot{X}$  من العلاقة (2.22)

$$(2.65) \quad \ddot{q} = J^{-1} \left( {}^0T_B \left[ r \ddot{\theta}_c e_r - r \dot{\theta}_c^2 n_r \right] \right) - \dot{J} \dot{q}$$

أما بالنسبة للعزم  $T_r$  المقاوم لحركة الذراع فيرد تأثيره إلى قوة معاكسة  $F_r$  على طرف المقود محمولة على الشعاع المماسي  $e_r$ .

$$(2.66) \quad F_r = -\frac{T_r}{r} e_r$$

ترد القوة  $F_r$  إلى الجملة  $RF_0$  لتشكل القوة الخارجة  $F_{ext}$  المؤثرة على الذراع.

$$(2.67) \quad F_{ext} = {}^0T_B F_r$$

بعد إيجاد القيود الهندسية (2.61) والديناميكية (2.63) و(2.65) بدلالة  $\theta_c$  وإيجاد عناصر مصفوفة العطالة  $B(q)$  (2.51) بالإضافة لمركبات شعاع الجاذبية  $G(q)$  (2.59)، وشعاع كوريوليس  $c(q, \dot{q})$  (2.52)، والقوة الخارجة  $F_{ext}$  نعوض المركبات في عبارة ديناميك الذراع (2.60) فينتج العزم الكلي الذي تقدمه الذراع.

$$(2.68) \quad \tau_a = B(q) \ddot{q} + c(q, \dot{q}) + G(q) + J^T F_{ext}$$

يُرد العزم الكلي للذراع إلى قوة  $F_a$  في الإحداثيات الديكارتية (فضاء العمليات) والمكتوبة في الجملة المرجعية  $RF_0$

$$(2.69) \quad F_a = (J^T)^{-1} \tau_a$$

تكتب القوة  $F_a$  في جملة المقود  $RF_B$

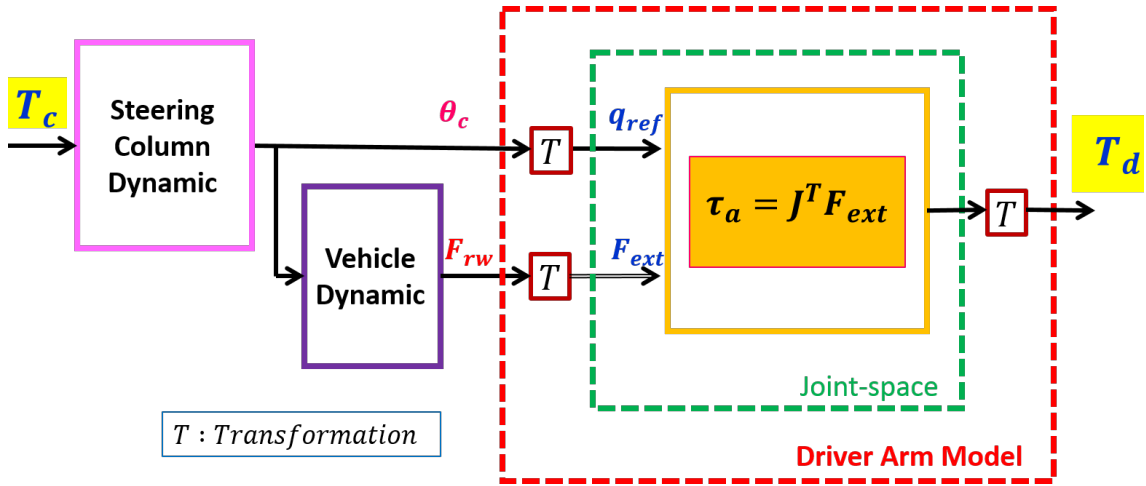
$$(2.70) \quad {}^B F_a = {}^B T_0 F_a$$

بإسقاط  ${}^B F_a$  على الشعاع المماسي  $e_r$  تنتج القوة الفعالة  $F_{eff}$  المسؤولة عن تحريك المقود

$$(2.71) \quad F_{eff} = e^T {}^B F_a$$

يكون عزم القوة الكلي الفعال المسؤول عن تدوير المقود  $T_d$

$$(2.72) \quad \boxed{T_d = r F_{eff}}$$

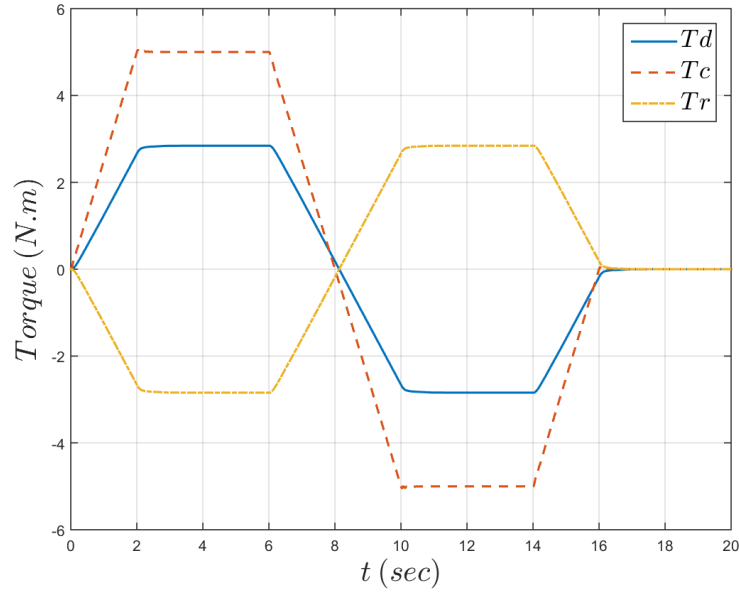


شكل 10.2 : آلية اختبار العزم الكلي لذراع السائق في وضع التوازن، إشارة عزم  $T_c$  تعتبر كإشارة دخل لنموذج ديناميك المقود، يولد ديناميك المقود بناءً على إشارة العزم زاوية المقود المقابل  $\theta_c$ ، تُستخدم الزاوية  $\theta_c$  كدخل لنموذج السيارة والذي يولد بدوره القوة المقاومة  $F_{rw}$ . يولد النموذج عزم السائق  $T_d$  بناءً على إشارات خرج كل من ديناميك السيارة وديناميك المقود  $F_{rw}$   $\theta_c$ .

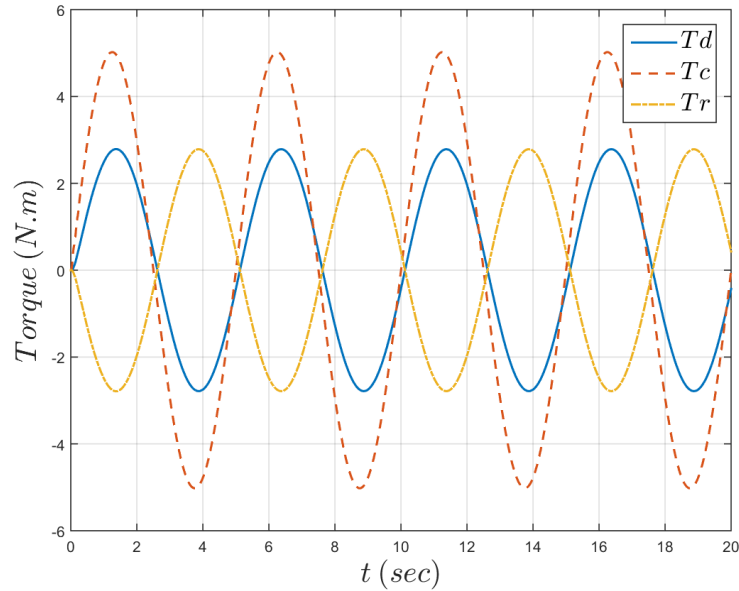
بعد إيجاد علاقة عزم السائق  $T_d$  لا بد من اختبار هذه العلاقة في وضع التوازن (توازن ذراع آلي) وذلك للتأكد من صحة النموذج، يبين الشكل (شكل 10.2) آلية اختبار العزم الكلي لذراع السائق في وضع التوازن، حيث تُستخدم بدايةً إشارة عزم  $T_c$  تعتبر كإشارة دخل لنموذج ديناميك المقود [8][54]، يولد ديناميك المقود بناءً على إشارة العزم زاوية المقود  $\theta_c$ ، تُستخدم الزاوية  $\theta_c$  كدخل لنموذج السيارة [8][54] (وهو نموذج حقيقي لسيارة بيجو 207) والذي يولد بدوره القوة المقاومة  $F_{rw}$ . نعتبر المركبات السابقة كدخل لنموذج العزم الكلي للسائق  $T_d$ . يتم مقارنة كل من العزم الكلي للسائق وعزم الدخل. نعتمد على متحولات أجزاء الذراع التالية لبناء النموذج :

$$\begin{aligned}
 l_1 &= 0.32m & d_1 &= 0.14m & m_1 &= 4.09kg \\
 I_{1xx} &= 15.65kg.m^2 & I_{1yy} &= 16.15kg.m^2 & I_{1zz} &= 1.92kg.m^2 \\
 l_2 &= 0.24m & d_2 &= 0.11m & m_2 &= 2.83kg \\
 I_{2xx} &= 4.28kg.m^2 & I_{2yy} &= 4.44kg.m^2 & I_{2zz} &= 0.5kg.m^2 \\
 d_s &= 0.43m & d_{ws} &= 0.4m & r &= 0.39m \\
 \alpha &= 10 \text{ deg} & V &= 10m.s^{-1} & &= 0
 \end{aligned}$$

يبين الشكل (شكل 11.2) إشارة الدخل  $T_c$  التي تكافئ العزم الحقيقي الذي يقدمه السائق لتدوير المقود على شكل شبه المنحرف وعزم السائق  $T_d$  الذي يولده النموذج المقترح. تم اختبار النموذج من أجل إشارة جيبيية لعزم السائق بمطال (5Nm) وتردد (0.2Hz)، ويبين الشكل (شكل 12.2) إشارة الدخل  $T_c$  الجيبية التي تكافئ العزم الحقيقي الذي يقدمه السائق لتدوير المقود وعزم السائق  $T_d$  الذي يولده النموذج المقترح. نلاحظ من الشكلين (شكل 11.2)



شكل 11.2 : استجابة النموذج في وضع التوازن لإشارة دخل على شكل شبه منحرف، حيث إشارة الدخل  $T_c$  التي تكافئ العزم الحقيقي الذي يقدمه السائق لتدوير المقود على شكل شبه المنحرف وعزم السائق  $T_d$  الذي يولده النموذج المقترح والعزم المقاوم  $T_r$  في وضع التوازن .



شكل 12.2 : استجابة النموذج في وضع التوازن لإشارة دخل جيبيية، حيث إشارة الدخل  $T_c$  الجيبيية تكافئ العزم الحقيقي الذي يقدمه السائق لتدوير المقود وعزم السائق  $T_d$  الذي يولده النموذج المقترح والعزم المقاوم  $T_r$  في وضع التوازن .

(شكل 12.2) أن العزم الذي يولده النموذج المقترح غير قادر على توليد (حساب) العزم الحقيقي الذي يقدمه السائق وأن العزم الذي يولده النموذج فعال فقط في وضع التوازن، ونلاحظ أن العزم الذي يقدمه النموذج  $T_d$  يتغلب على العزم المقاوم فقط  $T_r$ ، ونلاحظ أن الفرق بين مطال عزم السائق  $T_d$  و عزم الدخل  $T_c$  في الوضع الانتقالي، ويأتي هذا الفرق كون الذراع قادرة على استخدام عدد أكبر من الألياف العضلية وذلك عن طريق زيادة مستوى تفعيل العضلة MA. حيث يقوم الجهاز العصبي المركزي CNS بالتحكم بمستوى التفعيل تبعاً للظروف المطبقة على الذراع. لتعويض هذا الفرق ينبغي إضافة متحكم يكافئ عمل CNS في عملية زيادة مستوى تفعيل العضلة أو خفضه بحيث يكون قادر على تقديم العزم المطلوب ضمن المرحلة الانتقالية.

## 7.2 تعويض مساهمة تفعيل العضلات

أثر مستوى تفعيل العضلات يقوم الجهاز العصبي المركزي CNS بإعطاء الأوامر للعصبونات ألفا AM المسؤولة عن توليد القوة في العضلات [7][11]، تختلف القوة الناتجة عن العضلة تبعاً لعدد محركات ألفا AM الفعالة [7][11]. يزداد عدد العصبونات الفعالة بازدياد مستوى تفعيل العضلات MA ويظهر أثر مستوى التفعيل بشكل واضح أثناء المرحلة الإنتقالية Transition State TS لتوليد العزم، لذلك ينبغي إضافة متحكم لنموذج السائق لتعويض أثر تغير مستوى تفعيل العضلات MA للوصول للعزم المطلوب ضمن المرحلة الإنتقالية.

اختيار نمط التحكم يعتمد النموذج الديناميكي للذراع على قياس أطوال وأوزان أجزاء الذراع وعدة متغيرات فيزيائية أخرى، ينشأ عادةً أخطاء نتيجة قياس وتقدير هذه المقادير الفيزيائية أو نتيجة الفرضيات المطروحة لتبسيط عملية الدراسة، تؤدي هذه الأخطاء والتقريبات إلى ازاحة في الأشعة والمصفوفات المكونة لشعاع التحكم عن القيم الإسمية مما يؤثر على دقة النموذج المقترح، لذلك لا بد من أخذ هذه الأخطاء بعين الاعتبار وذلك باللجوء إلى نظريات التحكم الصلب. يعتبر النموذج الديناميكي للذراع الآلي من الأنظمة اللاخطية، لذلك سنستخدم الطرق اللاخطية لبناء المتحكم [50][53] ولمحاولة الوصول إلى أقرب نموذج ممكن يحاكي العزم المقدم من السائق أثناء عملية القيادة.

### 1.7.2 تصميم قانون تحكم يعوض مساهمة تفعيل العضلات

يتألف الذراع الآلي من عدة روابط تشكل عدة درجات حرية. يمكن استخدام النموذج الديناميكي العكسي للملاحقة في الفضاء الرباطي. نعيد كتابة النموذج الديناميكي للذراع [50][53]

$$(2.73) \quad B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = \tau_a$$

حيث يشتمل الشعاع  $n$  على الحدود اللاخطية، كما يشتمل على تأثير القوة الخارجية المؤثرة على الذراع، وذلك باعتبار المعرفة الكاملة لتأثير هذه القوة.

$$(2.74) \quad n(q, \dot{q}) = c(q, \dot{q}) + G(q) + J^T F_{ext}$$

نفترض أن

$$(2.75) \quad \tau_a = \hat{B}(q)y_r + \hat{n}(q, \dot{q})$$

حيث تمثل  $\hat{n}$  القيمة الحسابية المقدرة للحدود اللاخطية وتمثل  $\hat{B}$  القيمة الحسابية المقدرة لمصفوفة العطالة في النموذج الديناميكي، أما  $y_r$  فيمثل قانون التحكم الجديد. ينشأ عن الاختلاف بين القيم الحقيقية والقيم المقدرة خطأ، يمكن تمثيل هذا الخطأ بكل من  $\tilde{n}$  و  $\tilde{B}$

$$(2.76) \quad \tilde{B} = \hat{B} - B \quad \tilde{n} = \hat{n} - n$$

بتعويض (2.75) في ديناميك الذراع (2.73) [53][50]

$$(2.77) \quad B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = \hat{B}(q)y_r + \hat{n}(q, \dot{q})$$

بما أن مصفوفة العطالة  $B$  قلوبية

$$(2.78) \quad \ddot{q} = y_r + (B^{-1}\hat{B} - I_m)y_r + B^{-1}\tilde{n} = y_r - \eta$$

وتمثل  $\eta$  [53][50] أثر وجود  $\tilde{B}$  و  $\tilde{n}$  على  $\ddot{q}$

$$(2.79) \quad \eta = (I_m - B^{-1}\hat{B})y_r - B^{-1}\tilde{n}$$

حيث أن  $I_m$  المصفوفة الواحدية باختيار  $y_r$  من الشكل [53][50]

$$(2.80) \quad y_r = \ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q)$$

حيث أن  $K_P$  و  $K_D$  مصفوفات معرفة موجبة، و  $q_d$  تمثل القيم الرابطة المرغوبة، و  $\dot{q}_d$  تمثل السرعة الرابطة المرغوبة، و  $\ddot{q}_d$  تمثل التسارعات الرابطة المرغوبة، ومنه يكون ديناميك الذراع [53][50]

$$(2.81) \quad \ddot{q} + K_D\dot{\tilde{q}} + K_P\tilde{q} = \eta$$

حيث أن  $\tilde{q}$  تمثل الفرق بين القيم الرابطة المرغوبة والقيم الحقيقية، و  $\dot{\tilde{q}}$  تمثل الفرق بين السرعة الرابطة المرغوبة والقيم الحقيقية، و  $\ddot{\tilde{q}}$  تمثل الفرق بين التسارعات الرابطة المرغوبة والقيم الحقيقية. بما أن  $\eta$  تابع لخطي فالنظام في (2.81) مايزال مرتبط وغير خطي، ولا يمكن ضمان الاستقرار بالاعتماد على المتحكم PD فقط. ولإيجاد قانون التحكم الذي يضمن تقارب خطأ الملاحقة للمضرب بوجود الفرق بين القيم الحقيقية والتقديرية للمصفوفات نلجأ إلى طريقة ليايونوف المباشرة لتصميم حلقة التحكم.

ليكن المسار المرغوب  $q_d(t)$  وليكن  $\tilde{q} = q_d - q$  خطأ الموضع، وليكن مشتقه الأول  $\dot{\tilde{q}} = \dot{q}_d - \dot{q}$  والمشتق الثاني  $\ddot{\tilde{q}} = \ddot{q}_d - \ddot{q}$  بتعويض (2.78) في المشتق الثاني

$$(2.82) \quad \ddot{\tilde{q}} = \ddot{q}_d - y + \eta$$

بأخذ  $\xi$  [50][53]

$$(2.83) \quad \xi = \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix}$$

كمتحويلات الحالة وباشتقاق شعاع الحالة الجديد والإستفادة من (2.82) [50][53]

$$(2.84) \quad \dot{\xi} = H\xi + D(\ddot{q}_d - y_r + \eta)$$

بحيث  $H (2n \times 2n)$  و  $D (2n \times n)$  و  $n = 3$  عدد الروابط، وتأخذ هذه المصفوفات الشكل

$$(2.85) \quad H = \begin{bmatrix} O_m & I_m \\ O_m & O_m \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} O_m \\ I_m \end{bmatrix}$$

حيث تمثل  $O_m$  مصفوفة صفرية  $(3 \times 3)$ ، تتحول مسألة الملاحظة إلى إيجاد قانون تحكم  $y_r$  يضمن استقرار عبارة الخطأ (2.84) اللاحقة المتغيرة مع الزمن.

يعتمد تصميم التحكم على فرضية أن  $\eta$  غير معروفة ولكن يمكن تقدير مجال تغيرها. بالتالي يجب أن يضمن قانون التحكم  $y_r$  الاستقرار التقاربي ل (2.84) من أجل أي قيمة ل  $\eta$  ضمن مجال التغيرات. بملاحظة أن  $\eta$  في (2.79) تابعة ل  $q, \dot{q}, \ddot{q}_d$  نفترض عدة فرضيات [50][53]

$$(2.86) \quad \sup_{t \geq 0} \|\ddot{q}\| < Q_M < \infty \quad \forall \ddot{q}_d$$

حيث أن القيمة العظمى للتسارعات الرابطة.

$$(2.87) \quad \|I - B^{-1}(q)\hat{B}(q)\| \leq \alpha_R \leq 1 \quad \forall q$$

حيث أن القيمة العظمى للفرق للمصفوفة  $\hat{B}$ .

$$(2.88) \quad \|\tilde{n}\| \leq \Phi_n \leq \infty \quad \forall q, \dot{q}$$

يمثل  $\Phi_n$  الحد الأعلى للفرق بين القيمة الحسابية والقيمة الحقيقية لشعاع الحدود اللاحقة. تنص الفرضية (2.86) بأن أي مسار مرغوب لا يتطلب تسارع لانهائي. أما بالنسبة للفرضية (2.87)، وبما أن مصفوفة العطالة  $B$  مصفوفة معرفة موجبة ولها حد أعلى وحد أدنى يمكن تحقيق المتراجحة التالية

$$(2.89) \quad 0 < B_m \leq \|B^{-1}\| \leq B_M < \infty \quad \forall q$$

حيث تمثل  $B_M$  الحد الأعلى لمقلوب مصفوفة العطالة،  $B_m$  الحد الأدنى لمقلوب مصفوفة العطالة، وعندها يمكن دوماً إيجاد  $\hat{B}$  بحيث تحقق (2.87)، في الحقيقة يمكن مثلاً اختيار

$$\hat{B} = \frac{2}{B_m + B_M} I_m$$

نجد أن [50][53]

$$(2.90) \quad \|B^{-1}(q)\hat{B}(q) - I\| \leq \frac{B_M - B_m}{B_M + B_m} = \alpha_R \leq 1$$

أو يمكن تحديد حد أعلى للمصفوفة  $\tilde{B}$ ، في الحالة التي تكون فيها  $\hat{B}$  دقيقة جداً وقريبة من القيم الحقيقية نصل لحدود المتراجحة (2.87) (حيث يكون  $\hat{B} = B$  من أجل  $\alpha_R = 0$ ). أما بالنسبة للفرضية (2.88)، فوضع قيود على  $n$  بدوره يضع قيود على كل من  $q, \dot{q}$  فداًئماً ما توجد حدود إشباع لكل  $q, \dot{q}$ . بالعودة لـ (2.78) [50][53] نختار

$$(2.91) \quad \boxed{y_r = \ddot{q}_d + K_D \dot{\tilde{q}} + K_P \tilde{q} + \omega_r}$$

حيث يضمن PD الاستقرار، أما  $\omega_r$  فيجب اختياره ليضمن الصلادة بالنسبة لتغيرات  $\eta$  في (2.79)

باستخدام (2.91) [50][53] نعرف  $K$  بحيث  $K = [K_P \quad K_D]$

$$(2.92) \quad \dot{\xi} = \tilde{H}\xi + D(\eta - \omega_r)$$

حيث

$$\tilde{H} = H - DK = \begin{bmatrix} O & I \\ -K_P & -K_D \end{bmatrix}$$

جميع قيم المصفوفة  $\tilde{H}$  ذات جزء حقيقي سالب،  $K_P K_D$  مصفوفات معرفة موجبة، ويمكن توصيف ديناميك الخطأ باختيار

$$K_P = \text{diag} \{ \omega_{n1}^2, \omega_{n2}^2, \omega_{n3}^2 \} \quad K_D = \text{diag} \{ 2\zeta_1 \omega_{n1}, 2\zeta_2 \omega_{n2}, 2\zeta_3 \omega_{n3} \}$$

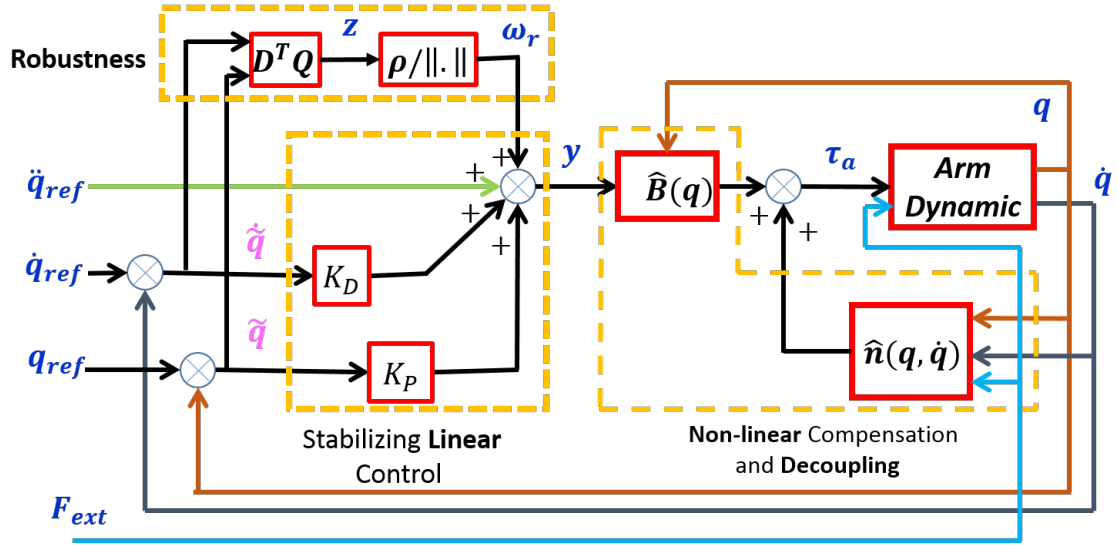
حيث يمثل  $\omega_{ni}$  التردد الطبيعي و  $\zeta_i$  معامل التخميد المرغوبين لكل رابطة و  $\text{diag}$  تعني مصفوفة قطرية وتحتوي عناصر القطر بين القوسين. في الحالة التي يكون فيها  $\omega_r = 0$  نعود لنمط التحكم بالنموذج الديناميكي العكسي (حيث يكون  $\hat{B} = B$  و  $\hat{n} = n$ ). لتحديد  $\omega_r$ ، نختار تابع لياونوف  $V$  [50][53] بالشكل التربيعي

$$(2.93) \quad V(\xi) = \xi^T Q \xi > 0 \quad \forall \xi \neq 0$$

حيث  $(2n \times 2n)$   $Q$  مصفوفة معرفة موجبة. بلاستفادة من مشتق الخطأ (2.92) [50][53] واشتقاق تابع لياونوف

$$(2.94) \quad \begin{aligned} \dot{V}(\xi) &= \xi^T Q \dot{\xi} + \dot{\xi}^T Q \xi \\ &= \xi^T (\tilde{H}^T Q + Q \tilde{H}) \xi + 2\xi^T Q D (\eta - \omega_r) \end{aligned}$$





شكل 13.2 : المخطط الصندوقي للتحكم الصلب بالذراع الآلي .

بما أن جميع القيم الذاتية ل  $\tilde{H}$  معرفة موجبة، إذاً من أجل إي مصفوفة متناظرة معرفة موجبة  $P$  فإن معادلة ليابونوف المستمرة [50][53]

$$(2.95) \quad \tilde{H}^T Q + Q \tilde{H} = -P$$

تعطي حل وحيد  $Q$  وهي أيضاً متناظرة معرفة موجبة. بتعويض (2.95) في مشتق تابع ليابونوف (2.94) [50][53]

$$(2.96) \quad \dot{V}(\xi) = -\xi^T P \xi + 2\xi^T Q D(\eta - \omega_r)$$

تقسم عبارة مشتق تابع ليابونوف إلى شقين، الأول هو  $(-\xi^T P \xi)$  وهو معرف سالب دوماً ومنه يتقارب الحل إذا كان  $\xi \in \mathcal{N}(D^T Q)$  حيث أن  $\mathcal{N}$  هي الفضاء الصفري. أما في حالة  $\xi \notin \mathcal{N}(D^T Q)$ ، يجب أن يتم اختيار التحكم  $\omega_r$  بحيث يضمن أن الشق الثاني أصغر أو يساوي الصفر دوماً. بوضع متحول وسيط  $z$  بحيث  $z = D^T Q \xi$  نعيد صياغة الشق الثاني من (2.96)  $z^T(\eta - \omega_r)$  ونعرف قانون التحكم  $\omega_r$  [50][53]

$$(2.97) \quad \omega_r = \frac{\rho}{\|z\|} z \quad \rho > 0$$

ومنه

$$(2.98) \quad \begin{aligned} z^T(\eta - \omega_r) &= z^T \eta - \frac{\rho}{\|z\|} z^T z \\ &\leq \|z\| \|\eta\| - \rho \|z\| \\ &= \|z\| (\|\eta\| - \rho) \end{aligned}$$

ومنه إذا تم اختيار [50][53]

$$(2.99) \quad \rho \leq \|\eta\| \quad \forall q, \dot{q}, \ddot{q}$$

يضمن قانون التحكم (2.97) بأن مشتق تابع ليابونوف  $\dot{V}$  أقل أو يساوي الصفر أيًا كانت مسار خطأ النظام. من أجل تحقيق المتراجحة (2.99) وبالاستفادة من (2.79) والرضيتين (2.88) و(2.78) و ملاحظة أن  $(\|\omega_r\| = \rho)$  ، نجد أن

$$(2.100) \quad \|\eta\| \leq \|I - B^{-1}\hat{B}\| (\|\ddot{q}_d\| + \|K\|\|\xi\| + \|\omega_r\|) + \|B^{-1}\|\|\tilde{n}\|$$

$$(2.101) \quad \|\eta\| \leq \alpha_R Q_M + \alpha_R \|K\|\|\xi\| + \alpha_R \rho + B_M \Phi_n$$

ومنه

$$(2.102) \quad \|\eta\| \leq \alpha_R Q_M + \alpha_R \|K\|\|\xi\| + \alpha_R \rho + B_M \Phi_n$$

بالاستفادة من (2.99) نجد أن  $\rho$  [53][50]

$$(2.103) \quad \rho \geq \frac{1}{1 - \alpha_R} (\alpha_R Q_M + \alpha_R \|K\|\|\xi\| + B_M \Phi_n)$$

ومنه

$$(2.104) \quad \dot{V}(\xi) = -\xi^T P \xi + 2z \left( \eta - \frac{\rho}{\|z\|} z \right) < 0 \quad \forall \xi \neq 0$$

ومنه يكون علاقة قانون التحكم  $\omega_r$  النهائية [53][50]

$$(2.105) \quad \omega_r = \begin{cases} \rho \frac{z}{\|z\|} & : \|z\| \neq 0 \\ \mathbf{0} & : \|z\| = 0 \end{cases}$$

ويمثل  $\rho$  ربح حد التحكم المتقطع  $\omega_r$  ، ولتوضيح اثر كل من المصفوفات  $P, K_D, K_P$  على تثقيل خطأ الملاحقة  $\xi$  نقوم بحل معادلة ليابونوف (2.93) بدلالة عناصر المصفوفات  $P, K_D, K_P, \tilde{H}$  بافتراض

$$P = \text{diag} \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6\}$$

$$K_P = \text{diag} \{k_{p1}, k_{p2}, k_{p3}\} \quad K_d = \text{diag} \{k_{d1}, k_{d2}, k_{d3}\}$$

بحل معادلة ليابونوف (2.95) نجد

$$(2.106) \quad Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 & \frac{P_1}{2k_{p1}} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 & \frac{P_2}{2k_{p2}} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 & 0 & \frac{P_3}{2k_{p3}} \\ \frac{P_1}{2k_{p1}} & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{P_2}{2k_{p2}} & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{P_3}{2k_{p3}} & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{11} &= \frac{P_1 k_{d1}^2 + P_4 k_{p1}^2 + P_1 k_{p1}}{2k_{d1}k_{p1}} \\
 Q_{22} &= \frac{P_2 k_{d2}^2 + P_5 k_{p2}^2 + P_2 k_{p2}}{2k_{d2}k_{p2}} \\
 Q_{33} &= \frac{P_3 k_{d3}^2 + P_6 k_{p3}^2 + P_3 k_{p3}}{2k_{d3}k_{p3}} \\
 Q_{44} &= \frac{P_1 + P_4 k_{p1}}{2k_{d1}k_{p1}} \\
 Q_{55} &= \frac{P_2 + P_5 k_{p2}}{2k_{d2}k_{p2}} \\
 Q_{66} &= \frac{P_3 + P_6 k_{p3}}{2k_{d3}k_{p3}}
 \end{aligned}
 \tag{2.107}$$

ومنه تتحد بنية الشعاع  $z$

$$z = D^T Q \xi = \begin{cases} \frac{P_1 \xi_1}{2k_{p1}} + \frac{\xi_4 (P_1 + P_4 k_{p1})}{2k_{d1}k_{p1}} \\ \frac{P_2 \xi_2}{2k_{p2}} + \frac{\xi_5 (P_2 + P_5 k_{p2})}{2k_{d2}k_{p2}} \\ \frac{P_3 \xi_3}{2k_{p3}} + \frac{\xi_6 (P_3 + P_6 k_{p3})}{2k_{d3}k_{p3}} \end{cases}
 \tag{2.108}$$

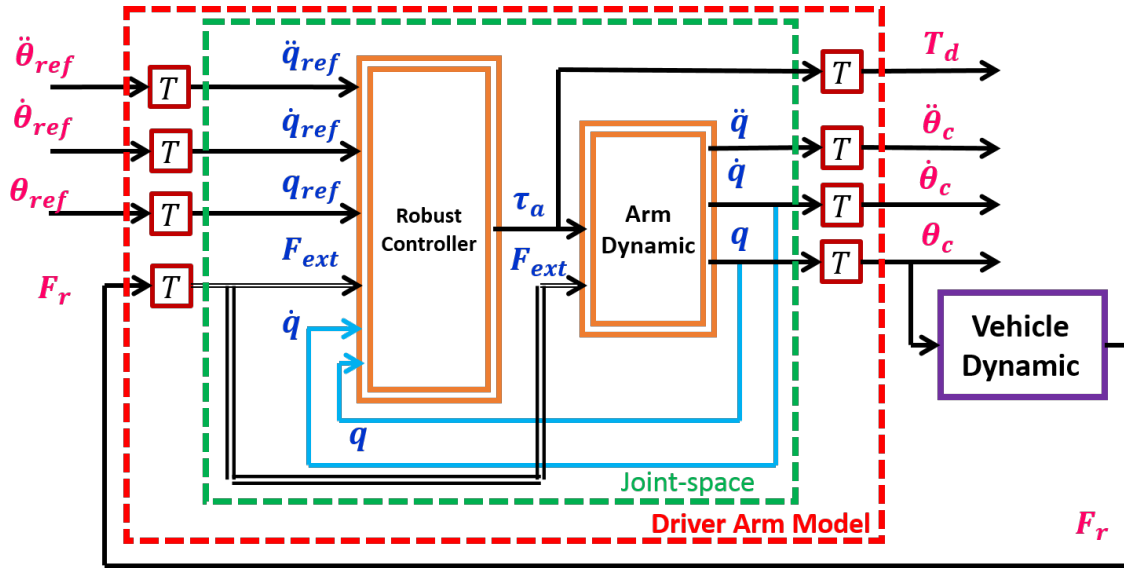
تبين العلاقة (2.108) تأثير كل من مركبات  $P, K_D, K_P$  على تثقيل الخطأ  $\xi$ ، فالعلاقة طردية بين  $P, \xi$  وعكسية مع  $K_D, K_P$ ، وبالتالي تحدد هذه المصفوفات تأثير الجزء اللاخطي  $\omega_r$  في قانون التحكم الكلي المبين في العلاقة (2.91). بعد الاعتماد على بنية المصحح الصلد للذراع، نقوم باختبار جملة السيارة والذراع.

## 2.7.2 التحقق من أداء قانون التحكم وصلادته عن طريق المحاكاة

يبين الشكل (شكل 14.2) المخطط الصندوقي لجملة السيارة والذراع، حيث يعتمد نموذج الذراع على زاوية المقود المطلوبة ومشتقاتها  $\theta_{ref}, \dot{\theta}_{ref}, \ddot{\theta}_{ref}$  و على القوة المقاومة  $F_r$ . تولد الذراع العزم  $T_d$  لتدوير المقود بالزاوية المرغوبة، يؤدي العزم المطبق على المقود لتدوير المقود بزاوية  $\theta_c$  وسرعة وتسارع زاويين  $\dot{\theta}_c, \ddot{\theta}_c$ . يتم توليد القوة المقاومة من نموذج السيارة [8][54] (وهو نموذج حقيقي لسيارة بيجو 207)، تُرد القوة المقاومة إلى عزم مقاوم مكافئ على المقود  $T_r$ .

### مركبات شعاع الخطأ $\xi$

الرابطة  $q_1$  يبين الشكل (شكل 15.2) شكل المتحول الرباطي  $q_1$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في الشكل (شكل 21.2) صورة مكبرة على مجال زمني ضيق لإظهار دقة الملاحظة للرابطة  $q_1$ ، حيث يظهر ثلاث منحنيات تختلف فيما بينها بالقيم الأسمية لمتحولات أجزاء الذراع ضمن مجال  $(5 \pm)$  (الكتل  $m_i$  والأطوال  $l_i$  وعزوم العطالة  $I_{ci}$ ) حيث تمثل  $q_{in}$



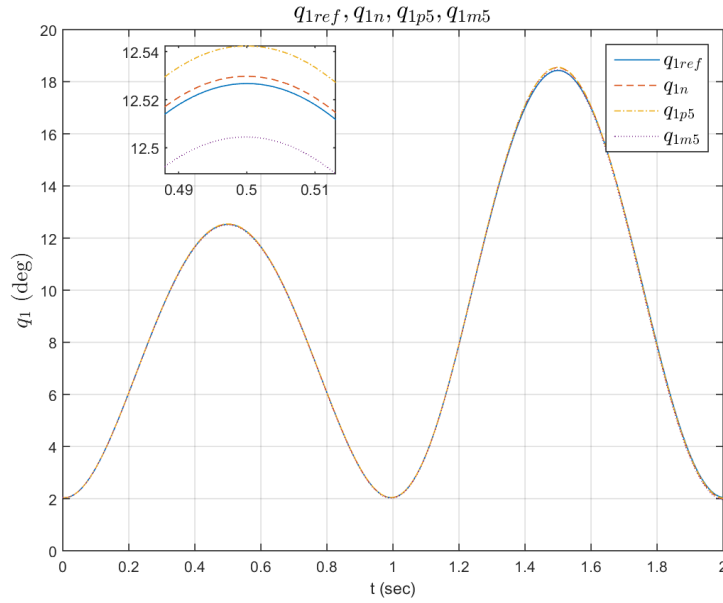
شكل 14.2 : المخطط الصندوقي لجملة السيارة والذراع [53].

حالة استخدام القيم الاسمية ، ويمثل  $q_{ip5}$  حالة تغير القيم الاسمية بمقدار  $(+5)$  ، ويمثل  $q_{im5}$  حالة تغير القيم الاسمية بمقدار  $(-5)$  ، كما يبين الشكل أنه في حالة تغير  $q_1 \in [2, 18](deg)$  وتغير القيم الاسمية ضمن مجال  $5 \pm$  يكون الخطأ  $\tilde{q}_1 \in [-0.02, +0.02](deg)$

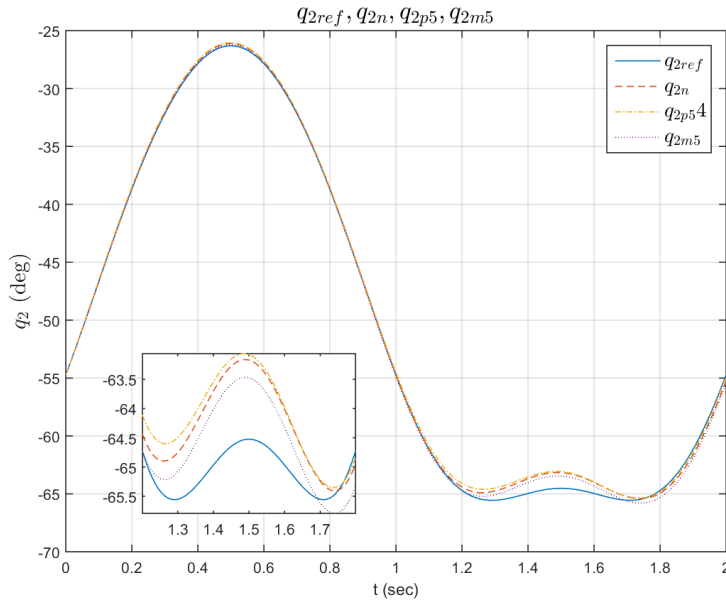
**الرابطة  $q_2$**  يبين الشكل (شكل 16.2) شكل المتحول الرباطي  $q_2$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في الشكل (شكل 21.2) صورة مكبرة على مجال زمني ضيق لإظهار دقة الملاحظة للرابطة  $q_2$  ، حيث يظهر ثلاث منحنيات تختلف فيما بينها بالقيم الاسمية لمتحولات أجزاء الذراع ضمن مجال  $(5 \pm)$  (الكتل  $m_i$  والأطوال  $l_i$  وعزوم العطالة  $I_{ci}$ ) ، كما يبين أنه في حالة تغير  $q_2 \in [-25, -70](deg)$  وتغير القيم الاسمية ضمن مجال  $5 \pm$  يكون الخطأ  $\tilde{q}_2 \in [-1.1, +1.1](deg)$

**الرابطة  $q_3$**  يبين الشكل (شكل 17.2) شكل المتحول الرباطي  $q_3$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في الشكل (شكل 21.2) صورة مكبرة على مجال زمني ضيق لإظهار دقة الملاحظة للرابطة  $q_3$  ، حيث يظهر ثلاث منحنيات تختلف فيما بينها بالقيم الاسمية لمتحولات أجزاء الذراع ضمن مجال  $(5 \pm)$  (الكتل  $m_i$  والأطوال  $l_i$  وعزوم العطالة  $I_{ci}$ ) ، كما يبين أنه في حالة تغير  $q_3 \in [35, 60](deg)$  وتغير القيم الاسمية ضمن مجال  $5 \pm$  يكون الخطأ  $\tilde{q}_3 \in [-0.2, +0.4](deg)$

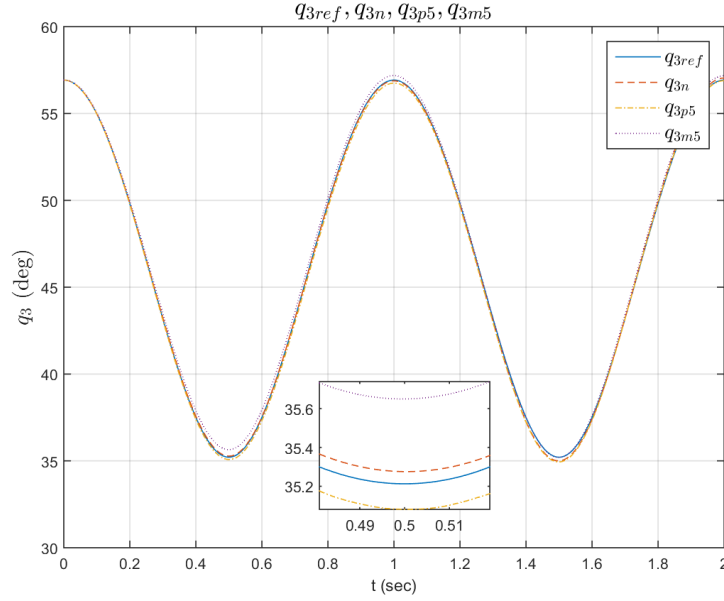
**السرعة الرابطة  $\dot{q}_1$**  يبين الشكل (شكل 18.2) شكل المتحول الرباطي  $\dot{q}_1$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في الشكل (شكل 21.2) صورة مكبرة على مجال زمني ضيق لإظهار دقة الملاحظة للسرعة الرابطة  $\dot{q}_1$  ، حيث يظهر ثلاث منحنيات تختلف فيما بينها بالقيم الاسمية



شكل 15.2 : شكل المتحول الرباطي  $q_1$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في (شكل 21.2) ، كما يبين صورة مكبرة على المجال الزمني  $t \in [0.49, 0.51]$  للإشارة المرجعية  $q_{1ref}$  و  $q_{1n}$  في حالة القيم الإسمية و  $q_{1p5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار +5% و  $q_{1m5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار -5% ..



شكل 16.2 : شكل المتحول الرباطي  $q_2$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في (شكل 21.2) ، كما يبين صورة مكبرة على المجال الزمني  $t \in [1.2, 1.8]$  للإشارة المرجعية  $q_{2ref}$  و  $q_{2n}$  في حالة القيم الإسمية و  $q_{2p5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار +5% و  $q_{2m5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار -5% ..

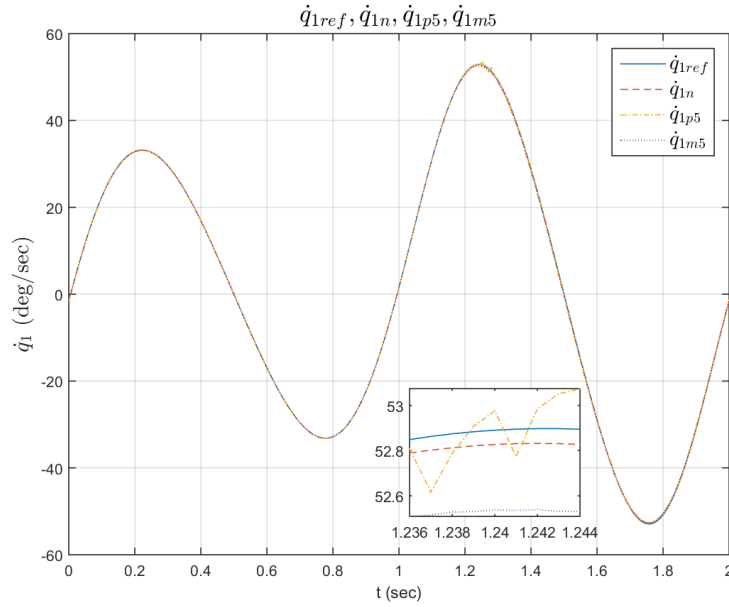


شكل 17.2 : شكل المتحول الرباطي  $q_3$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في (شكل 21.2) ، كما يبين صورة مكبرة على المجال الزمني  $t \in [0.48, 0.52]$  للإشارة المرجعية  $q_{3ref}$  و  $q_{3n}$  في حالة القيم الإسمية و  $q_{3p5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار +5% و  $q_{3m5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار -5% ..

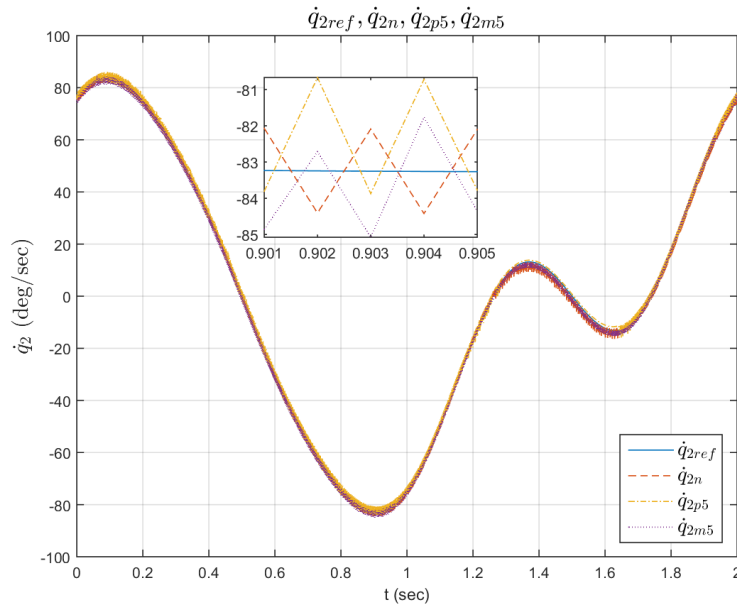
لمتحولات أجزاء الذراع ضمن مجال  $(5 \pm)$  (الكتل  $m_i$  والأطوال  $l_i$  وعزوم العطالة  $I_{ci}$ ) ، حيث يمثل حالة استخدام القيم الاسمية، وتمثل حالة تغير القيم الاسمية بمقدار  $(+5)$  ، وتمثل حالة تغير القيم الاسمية بمقدار  $(-5)$  ، ويظهر الشكل حالة التآرجح أو التذبذب ل  $\dot{q}_{1p5}$  حول إشارة السرعة الزاوية المرجعية  $\dot{q}_{1ref}$  بينما لا تظهر حالة التآرجح في الإشارتين الباقيتين ، كما يبين أنه في حالة تغير  $\dot{q}_1 \in [-60, +60](\text{deg/sec})$  وتغير القيم الأسمية ضمن مجال  $5 \pm$  يكون الخطأ  $\ddot{q}_1 \in [-0.4, 0.2](\text{deg/sec})$ .

**السرعة الرابطة  $\dot{q}_2$**  يبين الشكل (شكل 19.2) شكل المتحول الرباطي  $\dot{q}_2$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في الشكل (شكل 21.2) صورة مكبرة على مجال زمني ضيق لإظهار دقة الملاحقة للرابطة  $\dot{q}_2$  ، حيث يظهر ثلاث منحنيات تختلف فيما بينها بالقيم الأسمية لمتحولات أجزاء الذراع ضمن مجال  $(5 \pm)$  (الكتل  $m_i$  والأطوال  $l_i$  وعزوم العطالة  $I_{ci}$ ) وتظهر حالة التآرجح أو التذبذب في إشارات السرعة الزاوية الثلاث حول إشارة السرعة الزاوية المرجعية  $\dot{q}_{2ref}$  ، كما يبين أنه في حالة تغير  $\dot{q}_2 \in [-90, +90](\text{deg/sec})$  وتغير القيم الأسمية ضمن مجال  $5 \pm$  يكون الخطأ  $\ddot{q}_2 \in [-2, 2](\text{deg/sec})$ .

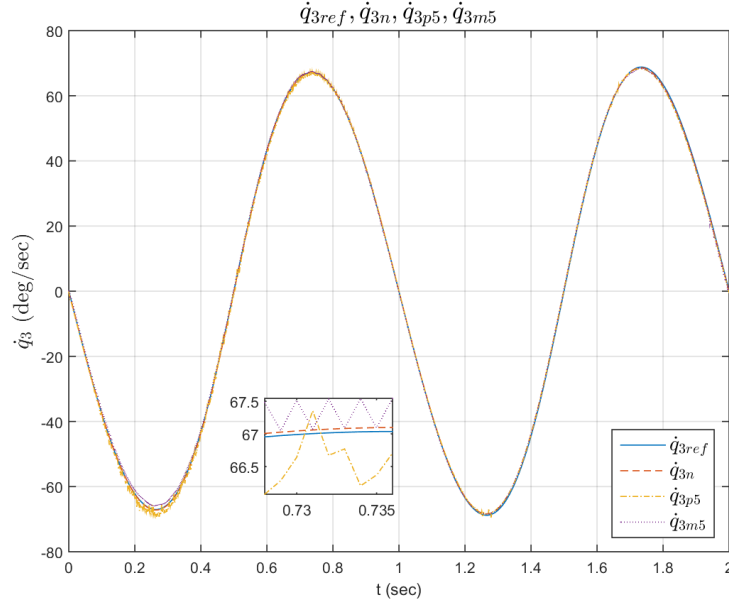
**السرعة الرابطة  $\dot{q}_3$**  يبين الشكل (شكل 20.2) شكل المتحول الرباطي  $\dot{q}_3$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في الشكل (شكل 21.2) صورة مكبرة على مجال زمني ضيق لإظهار دقة الملاحقة للرابطة  $\dot{q}_3$  ، حيث يظهر ثلاث منحنيات تختلف فيما بينها بالقيم الأسمية



شكل 18.2 : شكل المتحول  $q_1$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في (شكل 21.2) ، كما يبين صورة مكبرة على المجال الزمني  $t \in [1.236, 1.244]$  للإشارة المرجعية  $q_{1n}$  و  $q_{1ref}$  في حالة القيم الإسمية و  $q_{1p5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار +5% و  $q_{1m5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار ..-5%



شكل 19.2 : شكل المتحول الرباطي  $q_2$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في (شكل 21.2) ، كما يبين صورة مكبرة على المجال الزمني  $t \in [1.236, 1.244]$  للإشارة المرجعية  $q_{2n}$  و  $q_{2ref}$  في حالة القيم الإسمية و  $q_{2p5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار +5% و  $q_{2m5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار ..-5%



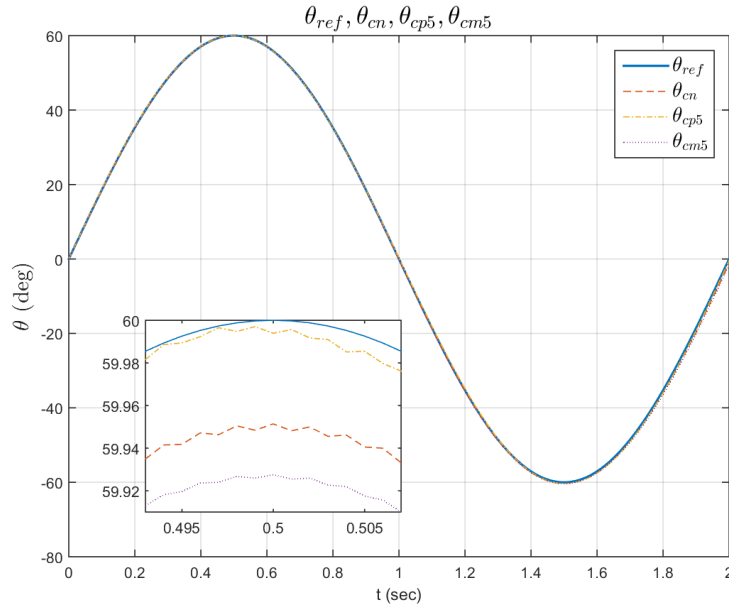
شكل 20.2 : شكل المتحول  $q_3$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية والمبينة في (شكل 21.2) ، كما يبين صورة مكبرة على المجال الزمني  $t \in [0.732, 0.736]$  للإشارة المرجعية  $q_{3ref}$  و  $q_{3n}$  في حالة القيم الإسمية و  $q_{3p5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار  $+5\%$  و  $q_{3m5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار  $-5\%$  ..

لمتحولات أجزاء الذراع ضمن مجال  $(\pm 5)$  (الكتل  $m_i$  والأطوال  $l_i$  وعزوم العطالة  $I_{ci}$ ) تظهر حالة التآرجح أو التذبذب في إشارات السرعة الزاوية  $q_{3m5}, q_{3p5}$  ، كما يبين أنه في حالة تغير  $q_3 \in [-70, +70](\text{deg/sec})$  وتغير القيم الأسمية ضمن مجال  $\pm 5$  يكون الخطأ  $\dot{q}_3 \in [-1, 0.5](\text{deg/sec})$ .

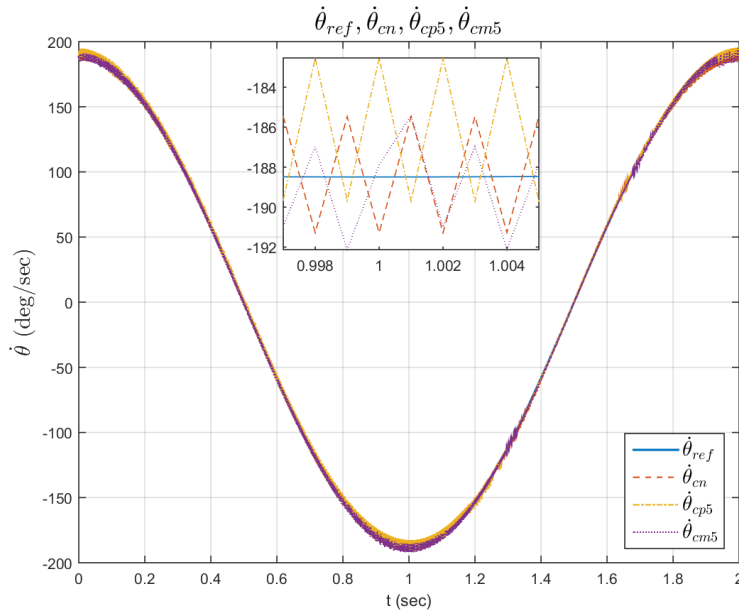
زاوية المقود  $\theta_c$  يبين الشكل (شكل 21.2) شكل زاوية المقود  $\theta_c$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية، وصورة مكبرة على مجال زمني ضيق لإظهار دقة الملاحقة ل  $\theta_c$  ، حيث يظهر ثلاث منحنيات تختلف فيما بينها بالقيم الأسمية لمتحولات أجزاء الذراع ضمن مجال  $(\pm 5)$  (الكتل  $m_i$  والأطوال  $l_i$  وعزوم العطالة  $I_{ci}$ ) ، كما يبين أنه في حالة تغير  $\theta_c \in [-60, +60](\text{deg})$  وتغير القيم الأسمية ضمن مجال  $\pm 5$  يكون الخطأ  $\tilde{\theta} \in [-0.02, 0](\text{deg})$ .

السرعة الزاوية للمقود  $\dot{\theta}_c$  يبين الشكل (شكل 22.2) السرعة الزاوية للمقود  $\dot{\theta}_c$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  جيبيية وإشارة سرعة مرجعية  $\dot{\theta}_{ref}$  ، وصورة مكبرة على مجال زمني ضيق لإظهار دقة الملاحقة ل  $\dot{\theta}_c$  ، حيث يظهر ثلاث منحنيات تختلف فيما بينها بالقيم الأسمية لمتحولات أجزاء الذراع ضمن مجال  $(\pm 5)$  (الكتل  $m_i$  والأطوال  $l_i$  وعزوم العطالة  $I_{ci}$ ) وتظهر حالة التآرجح أو التذبذب في إشارات السرعة الزاوية الثلاث حول إشارة السرعة الزاوية المرجعية  $\dot{\theta}_c$  ، كما يبين أنه في حالة تغير  $\dot{\theta}_c \in [-200, +200](\text{deg/sec})$  وتغير القيم الأسمية ضمن مجال  $\pm 5$  يكون الخطأ  $\tilde{\dot{\theta}} \in [-6, +4](\text{deg})$ .

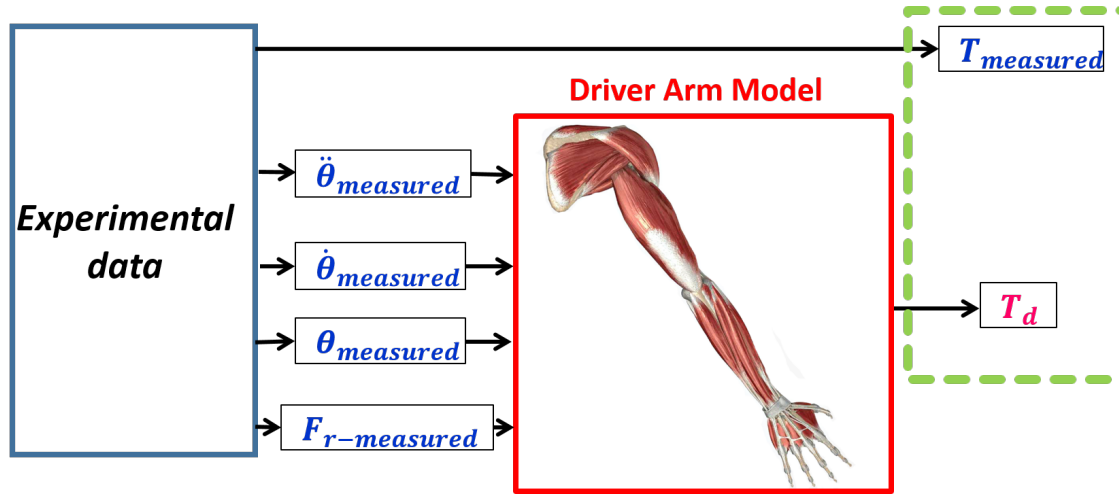




شكل 21.2 : زاوية المقود  $\theta_c$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  ، كما يبين صورة مكبرة على المجال الزمني  $t \in [0.494, 0.506]$  للإشارة المرجعية  $\theta_{ref}$  و  $\theta_{cn}$  في حالة القيم الإسمية و  $\theta_{cp5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار 5%+ و  $\theta_{cm5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار 5%-.



شكل 22.2 : السرعة الزاوية للمقود  $\dot{\theta}_c$  في حالة إشارة دخل  $\theta_{ref}$  إشارة سرعة مرجعية  $\dot{\theta}_{ref}$  ، كما يبين صورة مكبرة على المجال الزمني  $t \in [0.997, 1.005]$  للإشارة المرجعية  $\dot{\theta}_{ref}$  و  $\dot{\theta}_{1n}$  في حالة القيم الإسمية و  $\dot{\theta}_{1p5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار 5%+ و  $\dot{\theta}_{1m5}$  في حالة تغير القيم الإسمية بمقدار 5%-.



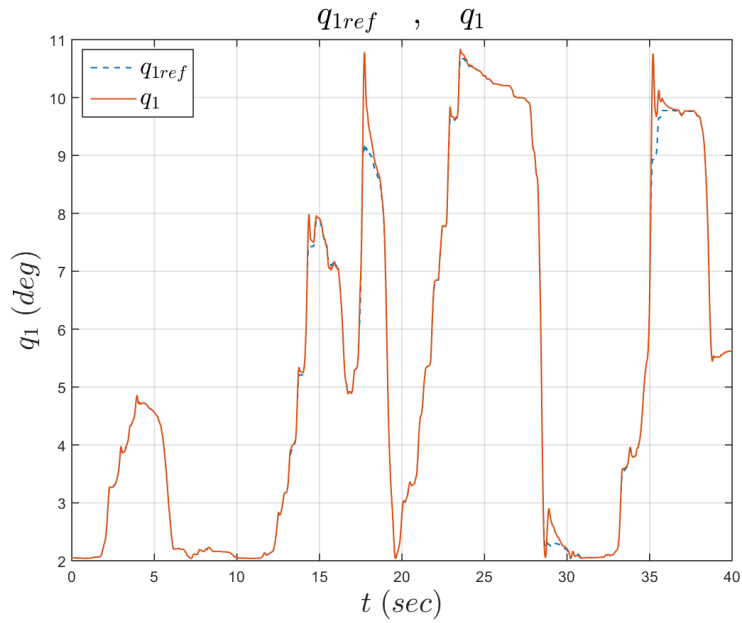
شكل 23.2 : المخطط الصندوقي لاختبار نموذج الذراع باستخدام المعطيات العملية .

## 8.2 التحقق العملي من النموذج المقترح

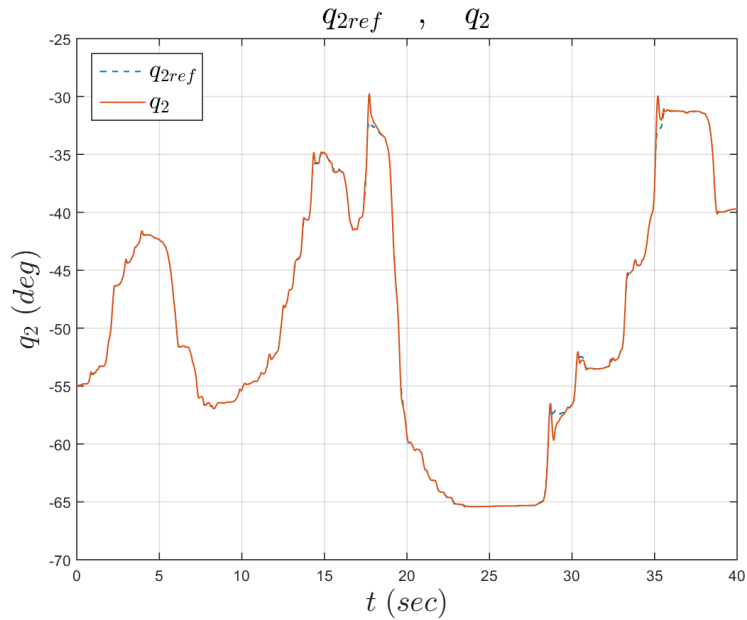
بعد اختبار نموذج الذراع في الحلقة المغلقة مع السيارة، نقوم بالتحقق من النموذج الكلي للذراع باستخدام معطيات حقيقية مقاسة من مقلد قيادة [54] [8]. يبين الشكل (شكل 23.2) المخطط الصندوقي لاختبار النموذج المقترح، يعتمد النموذج على قياسات زاوية المقود ومشتقاتها  $\ddot{\theta}_{measured}$ ,  $\dot{\theta}_{measured}$ ,  $\theta_{measured}$ ، وقوة المقاومة  $F_r-measured$  كإشارات دخل ليولد العزم الكلي للذراع  $\tau_a$ ، يتم إرجاع العزم إلى مستوي المقود  $T_d$  ومقارنته مع العزم الحقيقي المقاس  $T_{measured}$ .

**المتحولات الرباطية  $q$**  تشكل كل من المتحولات الرباطية والسرعة الرباطية للذراع مركبات شعاع الخطأ المبين في العلاقة (2.83)، تبين الأشكال (شكل 24.2) (شكل 25.2) (شكل 26.2) المتحولات الرباطية المرجعية  $q_{1ref}, q_{2ref}, q_{3ref}$  والموافقة لزاوية المقود المقاسة  $\theta_{ref}$  والمتحولات الرباطية للذراع  $q_1, q_2, q_3$ ، تظهر الأشكال الثلاث السابقة قدرة نموذج الذراع المقترح على الوصول للقيم الرباطية المرجعية ضمن دقة مقبولة لزاوية المقود  $\theta_c$ ، ويظهر أيضاً من (شكل 25.2) (شكل 26.2) أن أخطاء الملاحقة للرباطتين  $q_2, q_3$  تكون في اتجاهين متعاكسين وذلك حسب بنية نموذج الذراع ذو ثلاث درجات حرية مما يساعد تحسين دقة الملاحقة لزاوية المقود  $\theta_c$ .

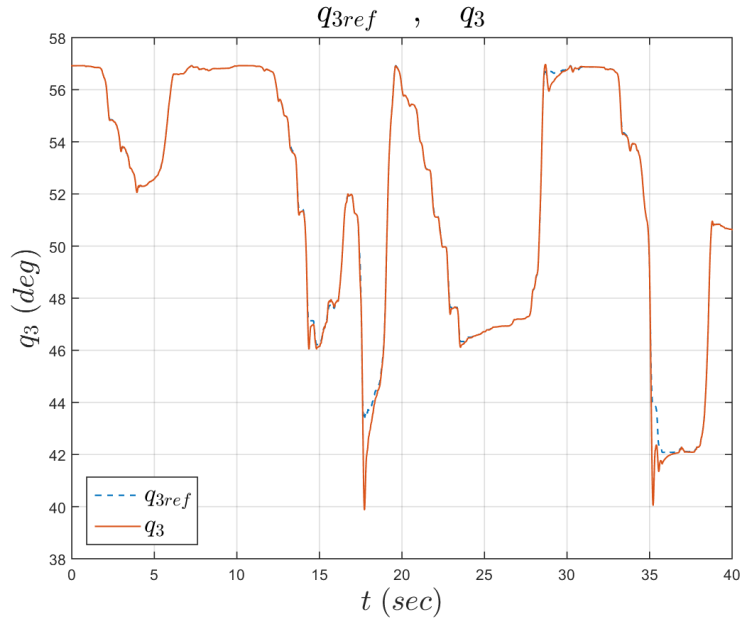
زاوية المقود  $\theta_c$  يبين الشكل (شكل 27.2) زاوية المقود المقاسة  $\theta_{measured}$  والمقاسة عملياً خلال (40 sec) والتي تتغير ضمن مجال  $\theta_{measured} \in [-60, 60](deg)$ ، كما يبين زاوية المقود التي يمكن أن يولدها نموذج الذراع  $\theta_c$  والتي تبدي تجاوز عن القيمة المرجعية في عدة مجالات زمنية.



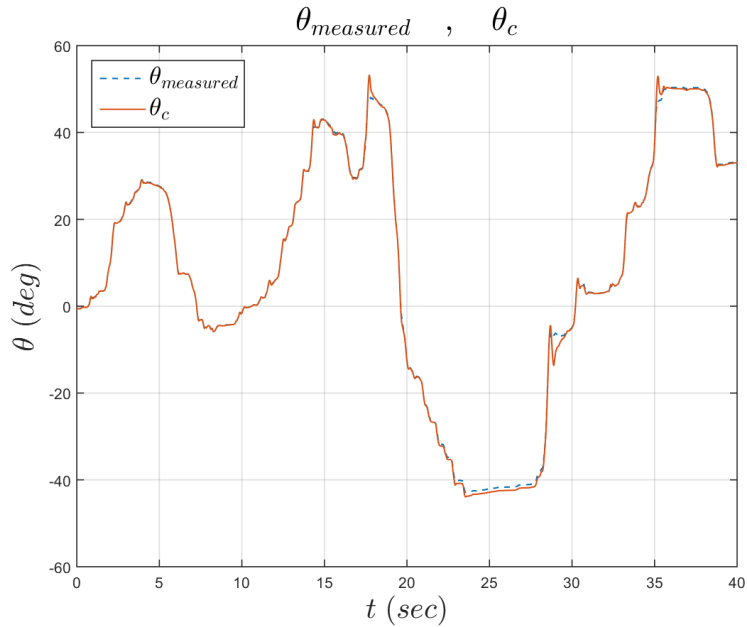
شكل 24.2 : المتحول الرباطي  $q_1$  الذي يولده نموذج الذراع والمتحول الرباطي المرجعي  $q_{1ref}$  والموافق لزاوية المقود الحقيقية .



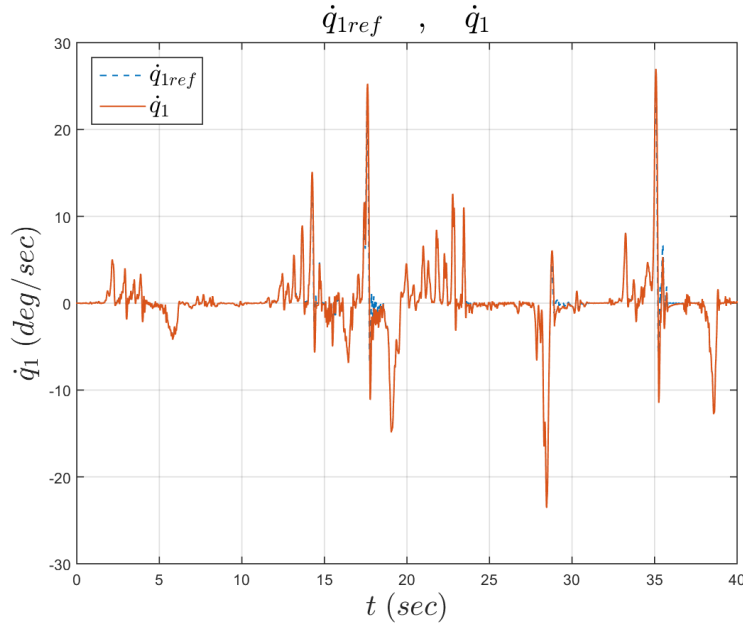
شكل 25.2 : المتحول الرباطي  $q_2$  الذي يولده نموذج الذراع والمتحول الرباطي المرجعي  $q_{2ref}$  والموافق لزاوية المقود الحقيقية .



شكل 26.2 : المتحول الرباطي  $q_3$  الذي يولده نموذج الذراع والمتحول الرباطي المرجعي  $q_{3ref}$  والموافق لزاوية المقود الحقيقية .



شكل 27.2 : زاوية المقود المقاسة  $\theta_{measured}$  والتي تستخدم كإشارة مرجعية وزاوية المقود التي يمكن أن يولدها نموذج الذراع  $\theta_c$  .

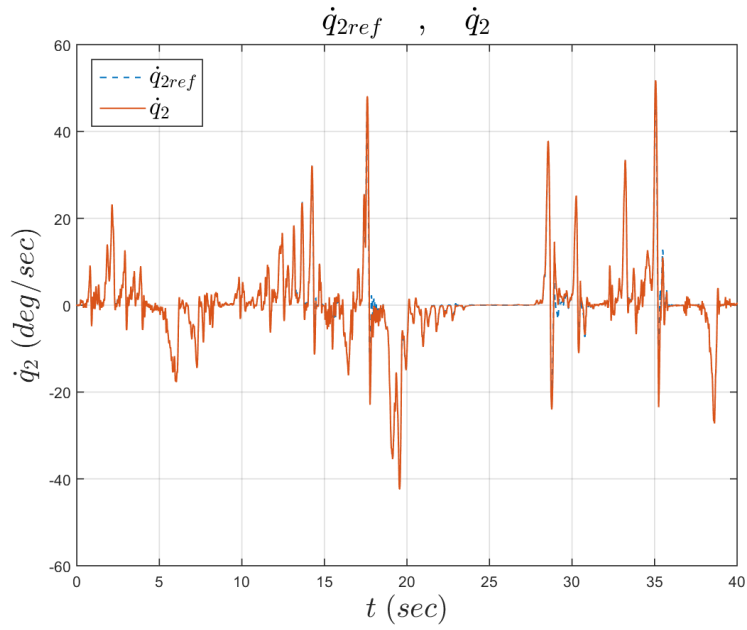


شكل 28.2 : السرعة الرباطية  $\dot{q}_1$  التي يولدها نموذج الذراع والسرعة الرباطية المرجعية  $\dot{q}_{1ref}$  والموافق لزاوية المقود وسرعتها الحقيقية .

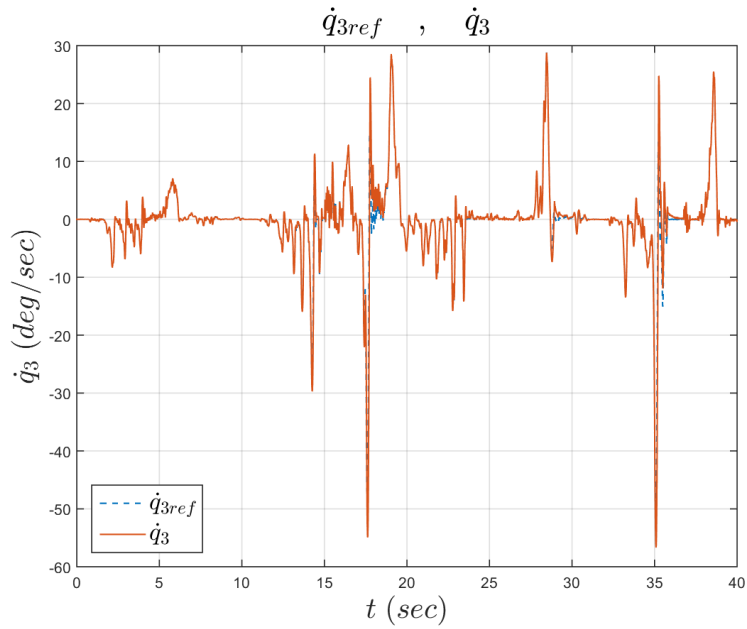
السرعة الرباطية  $\dot{q}$  تبين الأشكال (شكل 28.2) (شكل 29.2) (شكل 30.2) السرعة الرباطية المرجعية  $\dot{q}_{1ref}$  والموافق لزاوية المقود المقاسة  $\theta_{measured}$  والمتحولات الرباطية المرجعية  $q_{1ref}$  والسرعة الرباطية للذراع  $q$  ، تظهر الأشكال الثلاث السابقة قدرة نموذج الذراع المقترح على الوصول للقيم السرعة الرباطية المرجعية ضمن دقة مقبولة لكل من زاوية المقود  $\theta_c$  وسرعتها الزاوية  $\dot{\theta}_c$  ، ويظهر أيضاً من (شكل 29.2) (شكل 30.2) أن أخطاء الملاحظة للسرعتين للرباطتين  $\dot{q}_2, \dot{q}_3$  تكون في اتجاهين متعاكسين وذلك حسب بنية نموذج الذراع ذو ثلاث درجات حرية مما يساعد تحسين دقة الملاحظة لزاوية المقود  $\theta_c$  وسرعتها الزاوية  $\dot{\theta}_c$ .

السرعة الزاوية للمقود  $\dot{\theta}_c$  يبين الشكل (شكل 31.2) السرعة الزاوية للمقود  $\dot{\theta}_{measured}$  والمقاسة عملياً خلال (40 sec) والتي تتغير ضمن مجال  $\dot{\theta}_{measured} \in [-100, 125](\text{deg/sec})$  ، كما يبين السرعة الزاوية التي يمكن أن يولدها نموذج الذراع  $\dot{\theta}_c$  والتي تبدي تجاوز عن القيمة المرجعية في عدة مجالات زمنية.

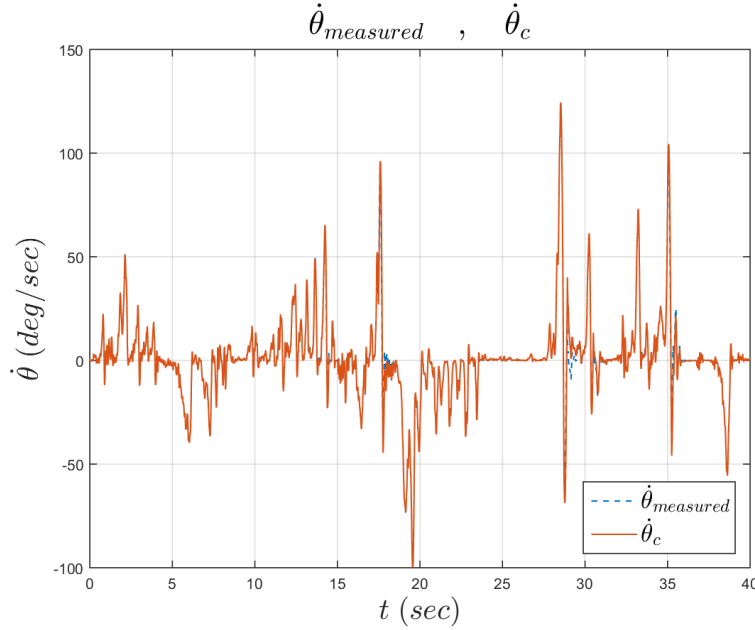
عزوم الروابط  $\tau_a$  يبين الشكل (شكل 32.2) شعاع العزم  $\tau_a$  و يبين العزوم المقدمة من الروابط الثلاث ، حيث العزم المقدم من الرابطة الأولى و  $\tau_{2a}$  العزم المقدم من الرابطة الثانية و  $\tau_{3a}$  ، ويظهر بأن العزوم الثلاثة تظهر حالة تنديب وذلك لتقديم العزم المناسب للروابط للوصول إلى قيمة المتحولات  $q_{ref}$  والسرعة الرباطية المطلوبة، ويظهر الشكل أيضاً أن مطال العزم المقدم من الرابطة الثانية  $\tau_{2a}$  أكبر من مطال العزم المقدم من الرابطة



شكل 29.2 : السرعة الرابطة  $\dot{q}_2$  التي يولده نموذج الذراع والسرعة الرابطة المرجعية  $\dot{q}_{2ref}$  والموافق لزاوية المقود وسرعتها الحقيقية .



شكل 30.2 : السرعة الرابطة  $\dot{q}_3$  التي يولده نموذج الذراع والسرعة الرابطة المرجعية  $\dot{q}_{3ref}$  والموافق لزاوية المقود وسرعتها الحقيقية .

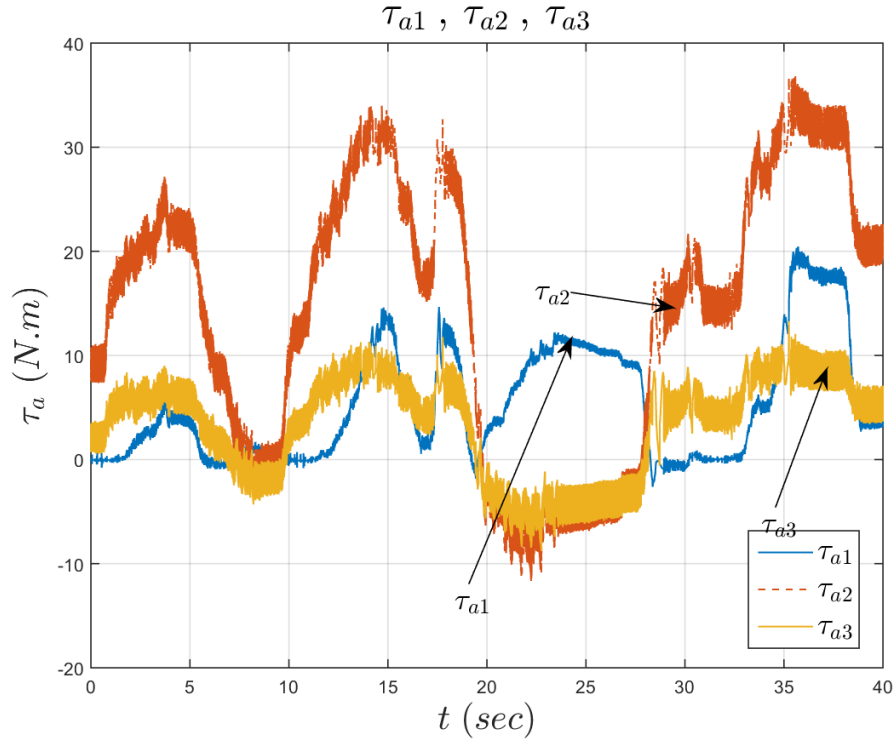


شكل 31.2 : السرعة الزاوية المقاسة للمقود  $\dot{\theta}_{measured}$  والسرعة الزاوية للمقود التي يمكن أن يولدها نموذج الذراع  $\dot{\theta}_c$ .

الثالثة  $T_{3a}$  والأولى  $T_{1a}$  ويرجع ذلك كون الرابطة الثانية تتطلب التغلب على القوى المطبقة عليها وعلى القوى المطبقة على الرابطة الثالثة لأن محوري الدوران للرابطتين متوازيين.

**عزم السائق  $T_d$**  يبين الشكل (شكل 33.2) العزم المطبق من نموذج الذراع على المقود  $T_d$ ، ويبين العزم المقاس  $T_{measured}$  المقاس خلال 40 sec من مقلد القيادة والموافق لزاوية المقود المقاسة  $\theta_{measured}$  وسرعتها الزاوية  $\dot{\theta}_{measured}$  وتسارعها الزاوي  $\ddot{\theta}_{measured}$ ، ويبين الشكل الاختلاف بين  $T_d$  و  $T_{measured}$  وذلك بالرغم من أن نموذج الذراع قادر على ملاحظة كل من  $\theta_{measured}$ ،  $\dot{\theta}_{measured}$  كما يبين الشكلان (شكل 27.2) (شكل 31.2)، ويظهر الشكل أيضاً عدم قدرة العزم المقدم من النموذج  $T_d$  على المناورة وتقديم العزم في الاتجاهين السالب والموجب كما هو الحال للعزم المقاس  $T_{measured}$  فتقع غالبية نقاط العزم  $T_d$  في القسم الموجب. ويبين الشكل (شكل 33.2) بأن الفرق يظهر من اللحظة  $(t = 0)$  ويمكن رد هذا الفرق لتأثير الجاذبية، حيث تقوم الروابط بتقديم جزء من العزم للتغلب على تأثير الجاذبية، ولكن هذا العزم غير مفيد إذ أنه لايفيد في تدوير المقود لذلك نقوم بفصل تأثير قوى الجاذبية وقوى كوريوليس أي الشعاعين  $G(q)$ ،  $c(q, \dot{q})$  عن المقود، حيث نقوم باعتبار هذه القوى تؤثر على أجزاء الذراع وتقوم الذراع بتقديم جزء من العزم لموازنة أجزاء الذراع وجزء لتدوير المقود والتغلب على القوى العزم المقاوم  $T_r$ .

**عزم السائق  $T_{dwn}$**  يبين الشكل (شكل 35.2) العزم المطبق من نموذج الذراع على المقود  $T_{dwn}$  من دون رد تأثير قوى الجاذبية وقوى كوريوليس إلى المقود، ويبين العزم  $T_{measured}$



شكل 32.2 : مركبات شعاع العزم  $\tau_a$  الثلاث، حيث  $\tau_{1a}$  العزم المقدم من الرابطة الأولى و  $\tau_{2a}$  العزم المقدم من الرابطة الثانية و  $\tau_{3a}$ .

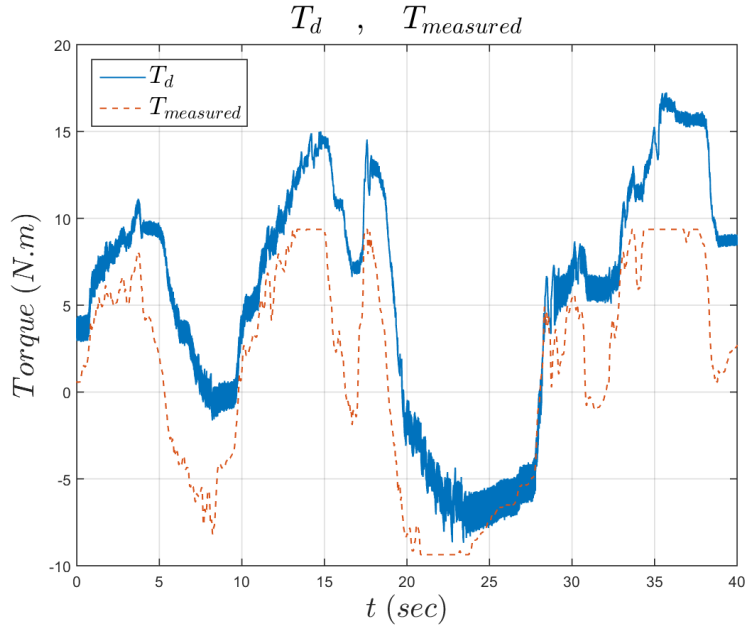
المقاس خلال 40 sec مقلدات القيادة. ويبين الشكل الاختلاف بين  $T_{down}$  و  $T_{measured}$  ولكن يظهر أيضاً أن  $T_{down}$  يبدأ من الصفر ولكن يبقى بمعظمه أصغر من العزم المقاس  $T_{measured}$ ، ويظهر الشكل أيضاً قدرة أفضل للعزم المقدم من النموذج  $T_{down}$  على المناورة وتقديم العزم في الاتجاهين السالب والموجب ولكن ليس كما هو حال العزم المقاس  $T_{measured}$ . ولمعرفة مدى التطابق بين العزم المقدم من النموذج  $T_{down}$  والعزم المقاس  $T_{measured}$  نقوم بإيجاد العلاقة بينهما كعلاقة خطية، ويبين الشكل (شكل 36.2)  $T_{down}$  بدلالة  $T_{measured}$ ، حيث يمثل المستقيم باللون الأحمر العلاقة الخطية الناتجة بينهما وبقيمة  $R^2 = 0.889$  وهي قيمة جيدة.

## 9.2 خاتمة

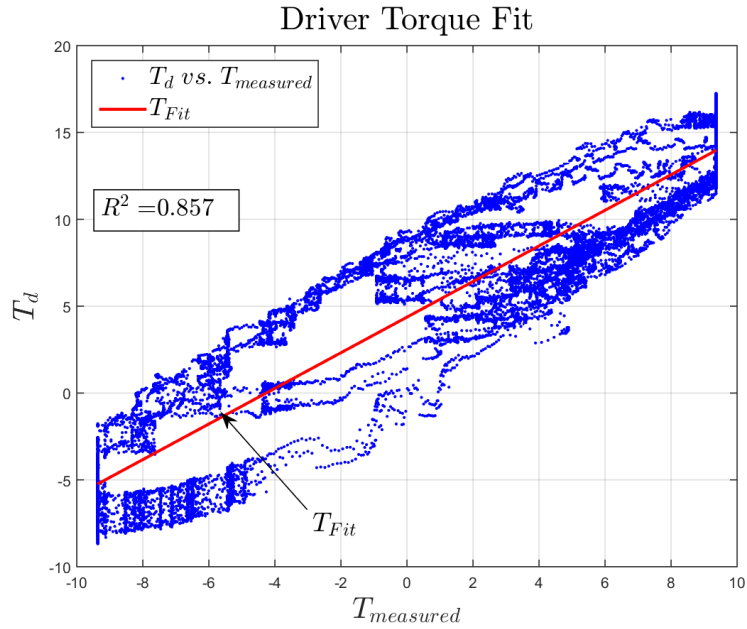
بيّنا في هذا الفصل بنية ذراع الإنسان العظمية، وناقشنا عدد درجات الحرية الأصغرية اللازمة لجعل حركة ذراع آلي مشابهة لحركة ذراع الإنسان. قمنا بدراسة كل من النموذج الهندسي المباشر والنموذج الهندسي العكسي، كما قمنا بإيجاد كل من النموذج التفاضلي والنموذج الديناميكي للذراع الآلي.

اختبرنا بعد ذلك العزم الذي يولده نموذج الذراع في وضع التوازن عن طريق المحاكاة،

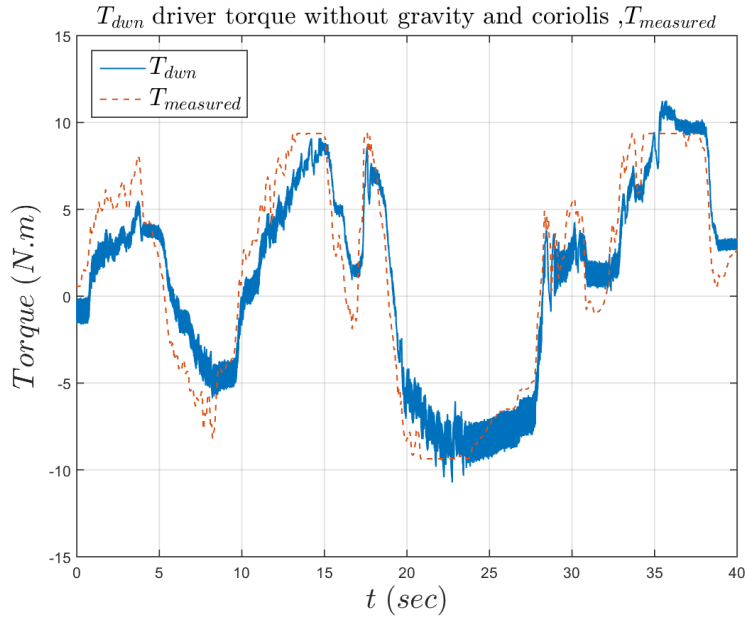




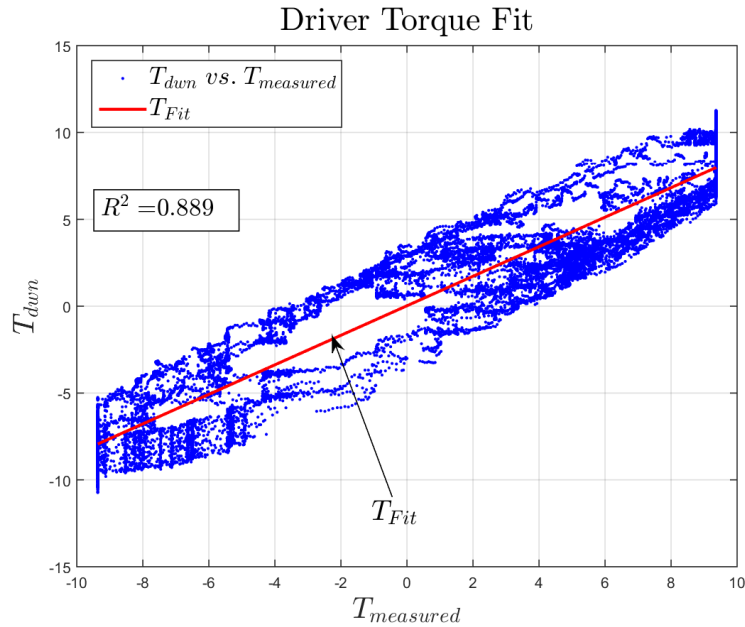
شكل 33.2 : العزم المطبق من نموذج الذراع على المقود  $T_d$  ، ويبين العزم المقاس  $T_{measured}$  خلال 40 sec .



شكل 34.2 : العلاقة الخطية بين العزم المطبق من نموذج الذراع على المقود  $T_d$  ، والعزم المقاس  $T_{measured}$  .



شكل 35.2: العزم المطبق من نموذج الذراع  $T_{down}$  من دون رد قوى الجاذبية وقوى كوريوليس إلى المقود، والعزم  $T_{measured}$  المقاس خلال 40 sec.



شكل 36.2: العلاقة الخطية بين العزم المطبق من نموذج الذراع على المقود  $T_{down}$  من دون رد تأثير قوى الجاذبية وقوى كوريوليس إلى المقود مع العزم المقاس  $T_{measured}$ .

ووضحنا دور تفعيل العضلات MA الأساسي في التحكم بالعزم الذي تولده الذراع، كما قمنا بتصميم متحكم صلد لنموذج الذراع يعوض مساهمة تفعيل العضلات، و قمنا بعد ذلك بالتحقق من النموذج الناتج في الحلقة المغلقة مع نموذج السيارة.

قمنا أخيراً باختبار نموذج ذراع السائق باستخدام قياسات عملية مأخوذة عن طريق مقلد قيادة، وناقشنا تأثير القوى اللاخطية على العزم الكلي لنموذج الذراع، حيث ووضحنا بأن هناك جزء من العزم الذي تولده الذراع لا يفيد في تدوير المقود بالرغم من الوصول لزاوية المقود المطلوبة.

## الفصل 3

# مطابقة الخواص اللزجة المرنة لذراع السائق

### 1.3 مقدمة

يمكن التعبير عن عزم السائق باستخدام الخواص اللزجة المرنة، ويمكن استخدام هذه الخواص لفهم آلية توليد العزم عند السائق مما يساعد في تصميم أنظمة مساعدة جديدة EPAS ، لكن لا يمكن قياس هذه الخواص لذلك يتم تصميم خوارزميات مطابقة لتقديرها.

يتولد العزم المطلوب من أجل تنفيذ حركة معينة في الجهاز العضلي-العظمي MSS Musculoskeletal System نتيجة التوازن بين مجموعات العضلات AgM و AtM ، تمتلك هذه العضلات خواص تشبه الخواص النابضية. تتغير الخواص النابضية للعضلات AtM و AgM بتغير مستوى التفعيل فيها MA. بناءً على هذه الخواص النابضية وُضعت عدة فرضيات أو نظريات ميكانيكية بهدف تفسير آلية عمل الذراع لضبط حركتها [56]. تعد نظرية نقطة التوازن EP واحدة من النظريات التي تحاول توظيف خواص المرنة-اللزجة للذراع لتفسير المسارات التي تتبعها اليد لتنفيذ حركة معينة، وتتضمن نظرية EP [56] ثلاث فرضيات وهي

(1). تُستخدم الخواص النابضية للتحكم بحركة الذراع.

(2). يولد الدماغ مسار نقاط التوازن EP المطلوب للحركة ويحولها لأوامر للعصبونات المحركة.

(3). تُستخدم مسارات التوازن دون الحاجة لحل المسألة الديناميكية.

تم نشر العديد من الأبحاث عن طرق مطابقة الأنظمة المتعلقة بنموذج السائق أو طرق مطابقة الخواص اللزجة-المرنة لذراع الإنسان. فقام Mussa-Ivaldi [57] بتقدير صلابة ذراع الإنسان من خلال تطبيق عدة انتقالات على اليد وبتقريب القوة حول وضع التوازن. كما قام

[58] Dolan بتوسيع عمل Mussa-Ivaldi يشمل مطابقة كل من عطالة وتخمين الذراع، حيث قام باستخدام طريقة التربيعات الأصغرية وثلاثة مرشحات للحصول على مشتقات موضع اليد. قام [24] Bennett باقتراح طريقة لمطابقة خواص المرفق (elbow) التابعة للزمن-time-variant ، وتعتمد الطريقة على نموذج ARMA والذي يعتمد على إجرائية معقدة لحساب خواص المرفق بالاعتماد على زاوية المرفق وعزم الاختبار أو عزم التحريض المطبق، وتتطلب الإجرائية القيام بحركات متشابهة ومن ثم إجراء خمس خطوات معالجة وذلك بهدف حساب الوسطي لهذه الحركات. طرح كل من Hollerbach و Xu [59] طريقة لحساب معاملات الممانعة (impedance) ، وتعتمد الطريقة على طريقة التربيعات الأصغرية الأساسية المقترحة في [24] ، ثم استخدام مرشح تمرير منخفض للحصول على زاوية المفصل (المرفق)، ومرشح تمرير مرتفع لفصل الحركات المتحرضة أو الحركات الإرادية عن الحركات الإرادية. قام Muldar [60] باستخدام نموذج للجهاز العصبي العضلي (NMS) لتوليد معطيات تابعة للزمن (time-variant)، ثم استخدم تحليل Wavelet لمطابقة نموذج admittances للجهاز العصبي العضلي التابع للزمن. في كل من [61] [62] [63] ثم مطابقة نموذج ممانعة خطي بمتحولات ثابتة من أجل حركات صغيرة، وتم المطابقة بتطبيق إشارة تحريض بمطال صغير وفترة زمنية صغيرة حول وضع التوازن. قام A.Marouf [54] وزملائه باقتراح طريقة لتقدير الخصائص المرنة للزجة في الزمن الحقيقي (viscoelastic) لذراع السائق أثناء قيادة السيارة، لاحتياج الطريقة لتطبيق عزم اضطراب مقاوم (إشارة تحريض) على ذراع السائق خلال القيادة، بل يتم تقدير الخصائص من عزم السائق نفسه ، مما يؤدي لتحسين الدقة الزمنية للمتحولات. حيث تم دمج نموذج تابع متغير مع الزمن (time-variant) للذراع مع نظام EPAS ، وتم تقدير نظام دخل-خرج باستخدام راصد يعتمد على الانمط المنزلقة (sliding-mode).

سنقوم في هذا الفصل بتقدير الخواص للزجة المرنة لذراع السائق بالاعتماد على نموذج ذو ثلاث درجات حرية وذلك انطلاقاً من قياسات عملية لدرجة حرية واحدة.

## 2.3 صياغة مسألة المطابقة

نرمز للطرف الأيسر من ديناميك الذراع في العلاقة (2.68) ب  $\Psi$  حيث

$$(3.1) \quad \psi(\ddot{q}, \dot{q}, q) = B(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + G(q)$$

ومنه نعيد كتابة ديناميك الذراع

$$(3.2) \quad \psi(\ddot{q}, \dot{q}, q) = \tau_a(\dot{q}, q, u_m) + \tau_{ext}$$

حيث  $\tau_{ext}$  عزوم القوى الخارجية المؤثرة على الذراع وله ثلاث مركبات  $[\tau_{ext1} \tau_{ext2} \tau_{ext3}]^T$  ، و  $u_m$  إشارة التحكم من الجهاز العصبي المركزي CNS . بتطبيق التغيرات الصغيرة  $\delta$  على

طرفي العلاقة (3.2)

$$(3.3) \quad \frac{\partial \psi}{\partial \ddot{q}} \delta \ddot{q} + \frac{\partial \psi}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} + \frac{\partial \psi}{\partial q} \delta q = \frac{\partial \tau_a}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} + \frac{\partial \tau_a}{\partial q} \delta q + \delta \tau_{ext}$$

ويعبر  $\delta$  عن التغيرات الصغيرة للمصفوفة أو الشعاع التالي لها . ويعبر  $\delta$  عن المشتق الجزئي للمصفوفة أو الشعاع التالي لها . نعرف مصفوفة الصلابة  $R_m$

$$(3.4) \quad R_m = -\frac{\partial \tau_a}{\partial q} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

نعرف مصفوفة اللزوجة  $D_m$

$$(3.5) \quad D_m = -\frac{\partial \tau_a}{\partial \dot{q}} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix}$$

$$(3.6) \quad \frac{\partial \psi}{\partial \ddot{q}} \delta \ddot{q} + \frac{\partial \psi}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} + \frac{\partial \psi}{\partial q} \delta q - \delta \tau_{ext} = -R_m \delta q - D_m \delta \dot{q}$$

نوجد المشتقات الجزئية ل  $\Psi$

$$(3.7) \quad \frac{\partial \psi}{\partial \ddot{q}} = B(q)$$

$$(3.8) \quad \frac{\partial \psi}{\partial \dot{q}} = \frac{\partial c(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}}$$

$$(3.9) \quad \frac{\partial \psi}{\partial q} = \frac{\partial B(q)}{\partial q} \ddot{q} + \frac{\partial c(q, \dot{q})}{\partial q} + \frac{\partial G(q)}{\partial q}$$

نعوض في (3.3)

$$(3.10) \quad B(q) \delta \ddot{q} + \frac{\partial c(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} + \left( \frac{\partial B(q)}{\partial q} \ddot{q} + \frac{\partial c(q, \dot{q})}{\partial q} + \frac{\partial G(q)}{\partial q} \right) \delta q - \delta \tau_{ext} = -R_m \delta q - D_m \delta \dot{q}$$

نضع  $\ell$  للاختصار

$$(3.11) \quad \ell = B(q) \delta \ddot{q} + \frac{\partial c(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} + \left( \frac{\partial B(q)}{\partial q} \ddot{q} + \frac{\partial c(q, \dot{q})}{\partial q} + \frac{\partial G(q)}{\partial q} \right) \delta q - \delta \tau_{ext}$$

نعيد كتابة مصفوفة العطالة وشعاع قوى كوريوليس و قوى الجاذبية  $B, c, G$  وفق

المتحولات الديناميكية  $Z_i$  المبينة في (3.12)

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= m_2 d_2^2 + I_{2yy} \\
 Z_2 &= m_2 d_2 l_1 \\
 Z_3 &= m_1 d_1^2 + I_{1yy} + m_2 l_1^2 \\
 Z_4 &= I_{2xx} \\
 Z_5 &= I_{1xx} \\
 Z_6 &= m_1 d_1^2 + I_{1zz} \\
 Z_7 &= m_2 (d_2^2 + l_1^2) + I_{2zz} \\
 Z_8 &= I_{2yy} - I_{2xx} + m_2 d_2^2 \\
 Z_9 &= I_{1yy} - I_{1xx} + m_1 (l_1^2 + d_2^2) \\
 Z_{10} &= I_{2yy} - I_{2xx} + m_2 d_2^2 \\
 Z_{11} &= g_0 m_2 d_2 \\
 Z_{12} &= g_0 (m_1 d_1 + m_2 l_1)
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

نعيد كتابة  $B$  باستخدام المتحولات الديناميكية  $Z_i$ .

$$B(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} Z_3 c_2^2 + 2Z_2 c_2 c_{23} + Z_1 c_{23}^2 + Z_5 s_2^2 + Z_4 s_{23}^2 & 0 & 0 \\ 0 & Z_6 + Z_7 + 2c_3 Z_2 & Z_7 + 2c_3 Z_2 \\ 0 & Z_7 + 2c_3 Z_2 & Z_7 + 2c_3 Z_2 \end{bmatrix}
 \tag{3.13}$$

نعيد كتابة  $c$  باستخدام المتحولات الديناميكية  $Z_i$ .

$$c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -2\dot{q}_1 \dot{q}_3 (c_2 s_{23} Z_2 + c_{23} s_{23} Z_8) - 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 (\sin(2q_2 + q_3) Z_2 + c_2 s_2 Z_9 + c_{23} s_{23} Z_8) \\ (\sin(2q_2 + q_3) Z_2 + c_2 s_2 Z_9 + c_{23} s_{23} Z_8) \dot{q}_1^2 - 2S_3 Z_2 \dot{q}_3^2 - 2S_3 Z_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \\ (c_2 s_{23} Z_2 + c_{23} s_{23} Z_{10}) \dot{q}_1^2 + S_3 Z_2 \dot{q}_2^2 - S_3 Z_2 \dot{q}_3^2 \end{bmatrix}
 \tag{3.14}$$

نعيد كتابة  $G$  باستخدام المتحولات الديناميكية  $Z_i$ .

$$G(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ c_2 Z_{12} + c_{23} Z_{11} \\ c_{23} Z_{11} \end{bmatrix}
 \tag{3.15}$$

نوجد مشتق  $c$  الجزئي بالنسبة ل  $\dot{q}$  ونرمز له  $c_{z\dot{q}}$

$$c_{z\dot{q}} = \frac{\partial c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} = \begin{bmatrix} c_{z\dot{q}11} & c_{z\dot{q}12} & c_{z\dot{q}13} \\ c_{z\dot{q}21} & c_{z\dot{q}22} & c_{z\dot{q}23} \\ c_{z\dot{q}31} & c_{z\dot{q}32} & c_{z\dot{q}33} \end{bmatrix}
 \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
cz_{\dot{q}11} &= -2\dot{q}_3(c_2s_{23}Z_2 + c_{23}s_{23}Z_8) - 2\dot{q}_2(\sin(2q_2 + q_3)Z_2 + c_2s_2Z_9 + c_{23}s_{23}Z_8) \\
cz_{\dot{q}12} &= 2\dot{q}_1(\sin(2q_2 + q_3)Z_2 + c_2s_2Z_9 + c_{23}s_{23}Z_8) \\
cz_{\dot{q}13} &= -2\dot{q}_1(c_2s_{23}Z_2 + c_{23}s_{23}Z_8) \\
cz_{\dot{q}21} &= 2\dot{q}_1(\sin(2q_2 + q_3)Z_2 + c_2s_2Z_9 + c_{23}s_{23}Z_8) \\
(3.17) \quad cz_{\dot{q}22} &= -2S_3Z_2\dot{q}_3 \\
cz_{\dot{q}23} &= 4S_3Z_2\dot{q}_3 - 2S_3Z_2\dot{q}_2 \\
cz_{\dot{q}31} &= 2\dot{q}_1(c_2s_{23}Z_2 + c_{23}s_{23}Z_{10}) \\
cz_{\dot{q}32} &= 2S_3Z_2\dot{q}_2 \\
cz_{\dot{q}33} &= -2S_3Z_2\dot{q}_3
\end{aligned}$$

نوجد مشتق  $c$  الجزئي بالنسبة ل  $q$  ونرمز له  $cz_q$

$$(3.18) \quad cz_q = \frac{\partial c(q, \dot{q})}{\partial q} = \begin{bmatrix} cz_{q11} & cz_{q12} & cz_{q13} \\ cz_{q21} & cz_{q22} & cz_{q23} \\ cz_{q31} & cz_{q32} & cz_{q33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
cz_{q11} &= -2\dot{q}_3(c_2s_{23}Z_2 + c_{23}s_{23}Z_8) - 2\dot{q}_2(\sin(2q_2 + q_3)Z_2 + c_2s_2Z_9 + c_{23}s_{23}Z_8) \\
cz_{q12} &= -2\dot{q}_1(\sin(2q_2 + q_3)Z_2 + c_2s_2Z_9 + c_{23}s_{23}Z_8) \\
cz_{q13} &= -2\dot{q}_1(c_2s_{23}Z_2 + c_{23}s_{23}Z_8) \\
cz_{q21} &= 2\dot{q}_1(\sin(2q_2 + q_3)Z_2 + c_2s_2Z_9 + c_{23}s_{23}Z_8) \\
(3.19) \quad cz_{q22} &= -2S_3Z_2\dot{q}_3 \\
cz_{q23} &= 4S_3Z_2\dot{q}_3 - 2S_3Z_2\dot{q}_2 \\
cz_{q31} &= 2\dot{q}_1(c_2s_{23}Z_2 + c_{23}s_{23}Z_{10}) \\
cz_{q32} &= 2S_3Z_2\dot{q}_2 \\
cz_{q33} &= -2S_3Z_2\dot{q}_3
\end{aligned}$$

نوجد مشتق  $G$  الجزئي بالنسبة ل  $\dot{q}$

$$(3.20) \quad \frac{\partial G(q)}{\partial \dot{q}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Z_{11}s_{23} - Z_{12}s_2 & -Z_{11}s_{23} \\ 0 & -Z_{11}s_{23} & -Z_{11}s_{23} \end{bmatrix}$$

نعرف شعاع المتحولات المرنة  $R_v$  وشعاع المتحولات للزجة  $D_v$

$$\begin{aligned}
(3.21) \quad R_v &= [R_{11} \ R_{12} \ R_{13} \ R_{21} \ R_{22} \ R_{23} \ R_{31} \ R_{32} \ R_{33}]^T \\
D_v &= [D_{11} \ D_{12} \ D_{13} \ D_{21} \ D_{22} \ D_{23} \ D_{31} \ D_{32} \ D_{33}]^T
\end{aligned}$$



نعرف شعاع المتحولات الكلي  $\chi$  فنحصل على نموذج التراجع (الإنحدار) الخطي Linear Regression Model المبين في (3.23)

$$(3.22) \quad \chi = \begin{bmatrix} D_V \\ R_V \end{bmatrix}$$

$$(3.23) \quad \boxed{\Phi^T \chi = \ell}$$

حيث  $\chi$  شعاع المتحولات الواجب تقديرها، و  $\ell$  شعاع الدخل المعلوم، و  $\Phi$  مصفوفة المعلومات المقاسة أو Regressor. وتكتب كما في العلاقة (3.24)

$$(3.24) \quad \Phi = \begin{bmatrix} -\delta\dot{q}_1 & 0 & 0 \\ -\delta\dot{q}_2 & 0 & 0 \\ -\delta\dot{q}_3 & 0 & 0 \\ 0 & -\delta\dot{q}_1 & 0 \\ 0 & -\delta\dot{q}_2 & 0 \\ 0 & -\delta\dot{q}_3 & 0 \\ 0 & 0 & -\delta\dot{q}_1 \\ 0 & 0 & -\delta\dot{q}_2 \\ 0 & 0 & -\delta\dot{q}_3 \\ -\delta q_1 & 0 & 0 \\ -\delta q_2 & 0 & 0 \\ -\delta q_3 & 0 & 0 \\ 0 & -\delta q_1 & 0 \\ 0 & -\delta q_2 & 0 \\ 0 & -\delta q_3 & 0 \\ 0 & 0 & -\delta q_1 \\ 0 & 0 & -\delta q_2 \\ 0 & 0 & -\delta q_3 \end{bmatrix}$$

تعتمد خوارزمية المطابقة على طريقة حساب التغيرات الصغيرة  $\delta$ ، ويمكن حساب التغيرات الصغيرة للمصفوفات والأشعة من القياسات التجريبية بالاعتماد على المشتق الأول أو بالاعتماد على المشتق الثاني. تبين العلاقة (3.25) طريق حساب  $\delta$  بالاعتماد على تعريف المشتق الأول، وتبين (3.26) طريق حساب  $\delta$  بالاعتماد على تعريف المشتق الثاني.

$$(3.25) \quad \begin{aligned} \delta q &= \frac{q_{i+1} - q_i}{T_s} \\ \delta \dot{q} &= \frac{\dot{q}_{i+1} - \dot{q}_i}{T_s} \\ \delta \ddot{q} &= \frac{\ddot{q}_{i+1} - \ddot{q}_i}{T_s} \end{aligned}$$

حيث  $q_i = q(i)$  و  $T_s$  هو دور التقطيع .

$$(3.26) \quad \begin{aligned} \delta q &= \frac{q_{i+1} - q_{i-1}}{2T_s} \\ \delta \dot{q} &= \frac{\dot{q}_{i+1} - \dot{q}_{i-1}}{2T_s} \\ \delta \ddot{q} &= \frac{\ddot{q}_{i+1} - \ddot{q}_{i-1}}{2T_s} \end{aligned}$$

### 3.3 حل مسألة المطابقة

يوجد العديد من الطرق لحل مسألة المطابقة المعروفة بالمعادلة (3.23). نعتد على خوارزمية التربيعات الأصغرية العودية المثقلة أسياً Exponentially Weighted EWRLS Recursive Least Squares لحل مسألة المطابقة. وتعتمد الخوارزمية على تصغير المعيار  $J_d$ .

$$(3.27) \quad J_d = \int_0^t \lambda^{t-\tau_d} (\ell(t) - \hat{\ell}(t))^2 dt; \quad \hat{\ell}(t) = \Phi(t)^T \hat{\chi}(t)$$

يُعطى حل مسألة المطابقة بالعلاقة (3.28) [64] [65] [66]

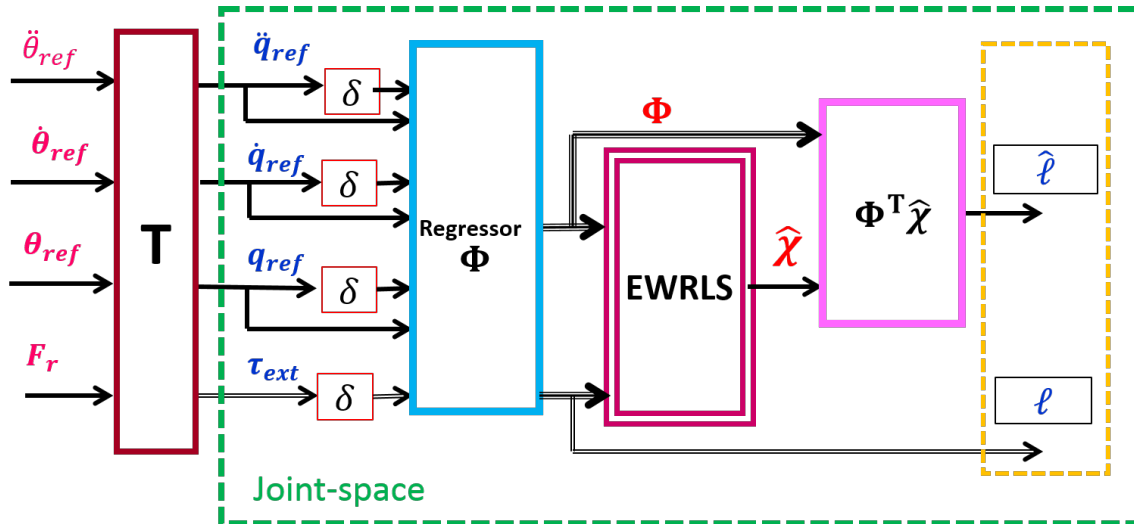
$$(3.28) \quad \begin{cases} \dot{\hat{\chi}} = P_d(t) \Phi(t) (\ell(t) - \Phi^T(t) \hat{\chi}(t)) \\ \dot{P}_d = -P_d(t) \Phi(t) \Phi^T(t) P_d(t) + \lambda P_d(t) \end{cases}$$

حيث  $\hat{\chi}$  هو شعاع البارامترات المقدرة و  $P_d$  تعبر عن مصفوفة التغير و  $\lambda$  هو معامل التثقيل . يبين الشكل (شكل 1.3) المخطط الصندوقي لعملية المطابقة. تشكل قياسات  $\theta_c$ ،  $\dot{\theta}_c$ ،  $\ddot{\theta}_c$ ،  $F_r$  المحصلة عملياً عبر مقلد قيادة [54][8] دخل عملية المطابقة، تُردّ هذه القياسات إلى مستوى الروابط عبر التحويلات المناسبة، ويتم حساب المصفوفة  $\Phi$ . يتم بعدها مكاملة العلاقات (3.28) عبر الزمن للحصول على شعاع البارامترات المقدرة  $\hat{\chi}$ . يتم بعدها حساب المقدّر ومقارنته مع  $\ell$ . عند الحصول على نسبة تقارب جيدة بين الشعاعين  $\hat{\ell}$  و  $\ell$  تكون البارامترات المقدرة  $\hat{\chi}$  قريبة من البارامترات الحقيقية وتعبر عن الخواص للزجة المرنة لذراع السائق. تم إنشاء نموذج للمطابقة ضمن برنامج Matlab R2015a في بيئة Simulink، وتم الاعتماد على تعريف المشتق الثاني المبين في (3.26) لحساب التغيرات الصغيرة  $\delta$ .

### 4.3 النتائج الأولية لعملية المطابقة

**المركبة  $\ell_1$**  يبين (شكل 2.3) المركبة الأولى  $\ell_1$  من الشعاع  $\ell$  والمركبة الأولى المقدرة  $\hat{\ell}_1$ ، نلاحظ أن المركبة المقدرة قريبة من المركبة المحسوبة عن طريق التحويلات الرياضية والقياسات العملية. يبين (شكل 3.3) العلاقة الخطية بين المركبتين وبخطاً ( $R^2 = 0.877$ ).

**المركبة  $\ell_2$**  يبين (شكل 4.3) المركبة الثانية  $\ell_2$  من الشعاع  $\ell$  والمركبة الثانية المقدرة  $\hat{\ell}_2$ ، نلاحظ أن المركبة المقدرة قريبة من المركبة المحسوبة عن طريق التحويلات الرياضية والقياسات العملية. يبين (شكل 5.3) العلاقة الخطية بين المركبتين وبخطاً ( $R^2 = 0.744$ ).



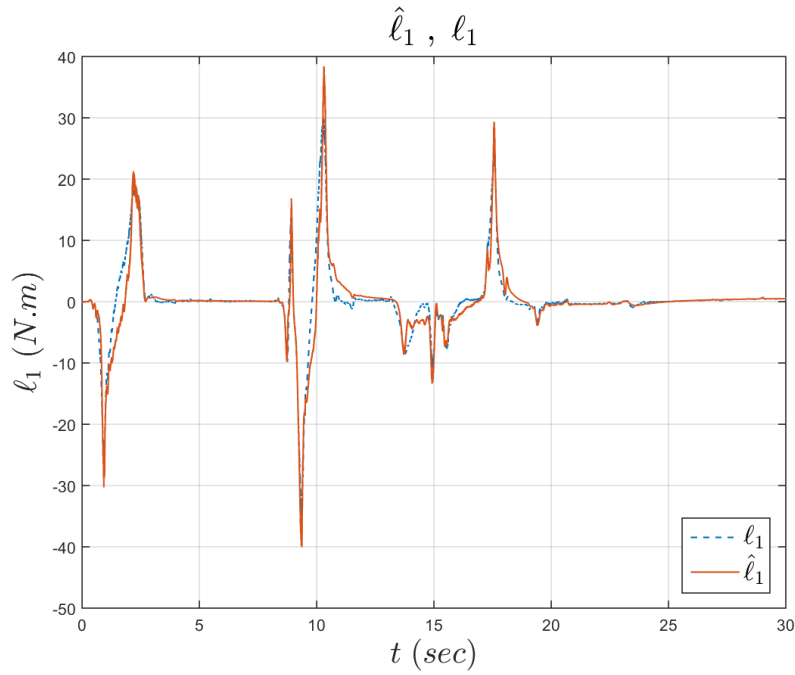
شكل 1.3 : المخطط الصندوقي لعملية المطابقة. تشكل قياسات  $\theta_c$ ،  $\dot{\theta}_c$ ،  $\ddot{\theta}_c$ ،  $F_{rw}$  المحصلة عملياً عبر مقلد قيادة دخل عملية المطابقة، تُرد هذه القياسات إلى مستوى الروابط عبر التحويلات المناسبة، ويتم حساب المصفوفة  $\Phi$ . يتم بعدها حساب مكاملة العلاقات (3.28) عبر الزمن للحصول على شعاع البارامترات المقدرة  $\hat{\chi}$ .

المركبة  $\ell_3$  يبين (شكل 6.3) المركبة الثالثة  $\ell_3$  من الشعاع  $\ell$  والمركبة الثالثة المقدرة  $\hat{\ell}_3$ ، نلاحظ أن المركبة المقدرة قريبة من المركبة المحسوبة عن طريق التحويلات الرياضية والقياسات العملية. يبين (شكل 7.3) العلاقة الخطية بين المركبتين وبخطاً ( $R^2 = 0.756$ ).

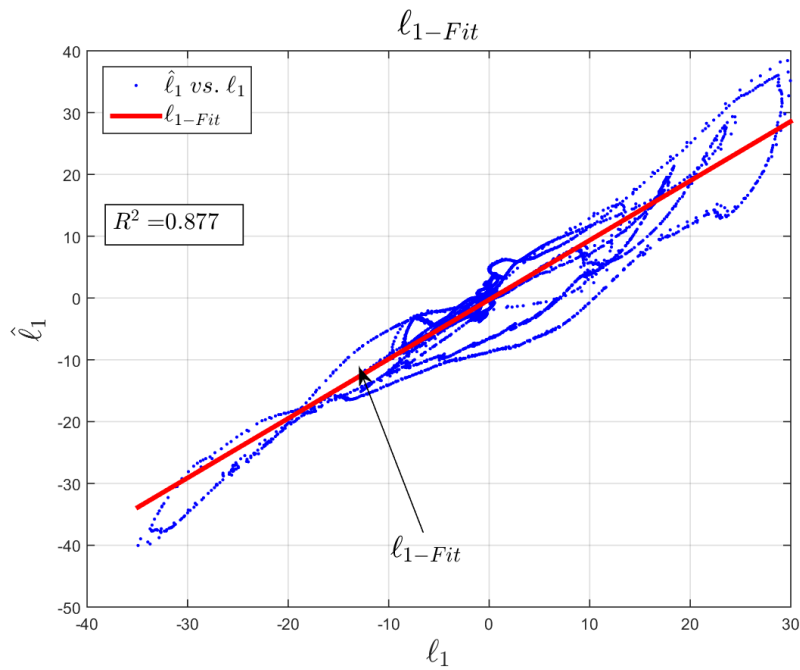
الخواص المرنة - اللزجة  $D_m R_m$  تم تقدير الخواص المرنة لذراع السائق، وهي عبارة عن تسعة عناصر تمثل تغير عزم روابط (مفاصل) ذراع السائق مع تغير قيم الروابط، وتم تقدير الخواص اللزجة لذراع السائق، وهي عبارة عن تسعة عناصر تمثل تغير عزم روابط (مفاصل) ذراع السائق مع تغير السرعة الرابطة وتبين الأشكال (شكل 8.3) (شكل 9.3) (شكل 10.3) الخواص اللزجة المرنة لذراع السائق، ويمكن ملاحظة تغير الخواص اللزجة المرنة تبعاً للقيم الرابطة  $q$  المبينة في (شكل 24.2) (شكل 25.2) (شكل 26.2) والسرعة الرابطة  $\dot{q}$  المبينة في (شكل 28.2) (شكل 29.2) (شكل 30.2) وتبعاً للعزوم المقدمة من الروابط المبينة في (شكل 32.2). حيث يغير السائق الخواص اللزجة المرنة لذراعه للوصول للزاوية المرغوبة. يولد التغير في الخواص اللزجة المرنة العزم المطلوب لتدوير المقود.

### 5.3 خاتمة

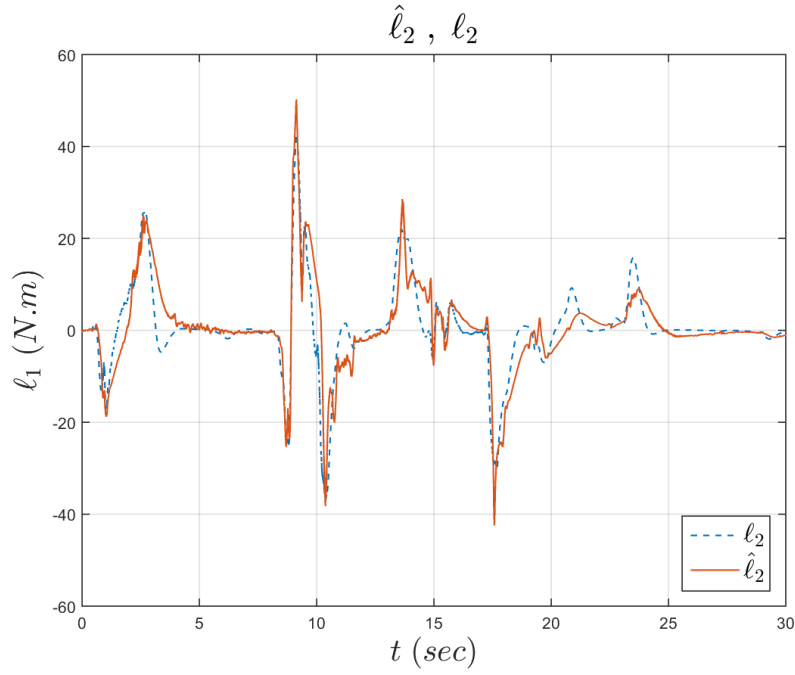
قمنا في هذا القسم بعرض دراسة مرجعية عن طرق مطابقة ذراع السائق وطرق إيجاد الخواص اللزجة المرنة للذراع، ثم قمنا بصياغة مسألة المطابقة على شكل مسألة خطية. قمنا ببناء نموذج للمطابقة في بيئة Simulink ضمن برنامج Matlab لحل مسألة المطابقة.



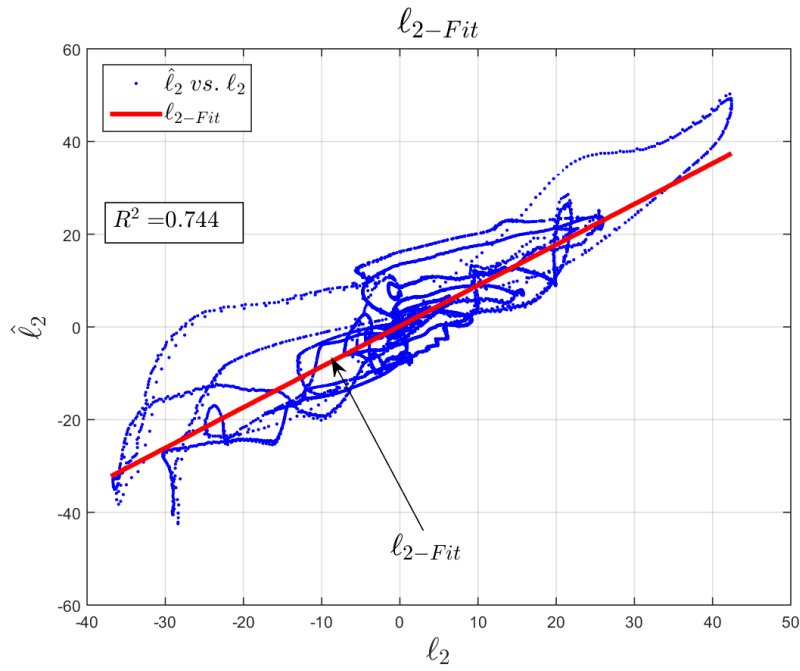
شكل 2.3 : المركبة الأولى  $l_1$  من الشعاع  $l$  والمركبة الأولى المقدرة  $\hat{l}_1$ .



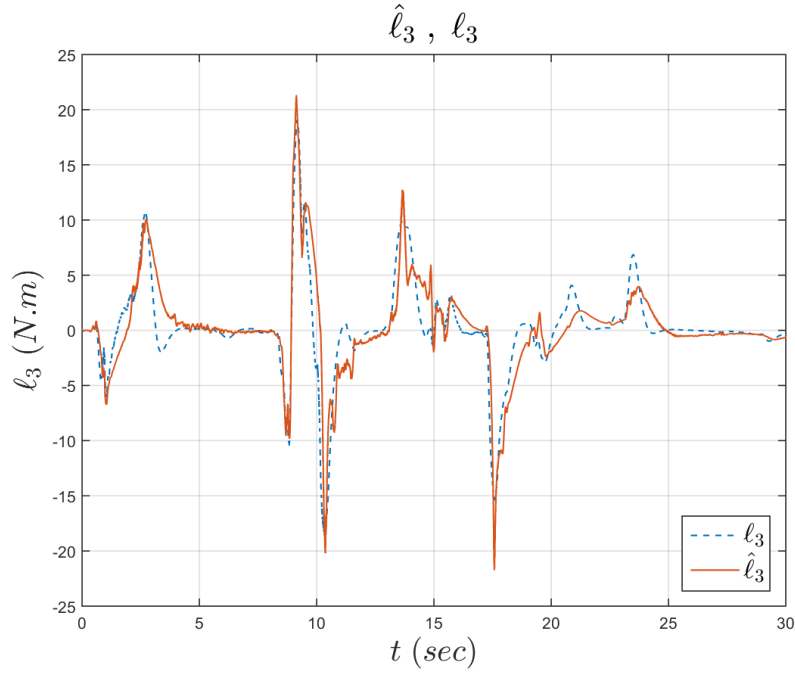
شكل 3.3 : العلاقة الخطية بين المركبة الأولى  $l_1$  من الشعاع  $l$  والمركبة الأولى المقدرة  $\hat{l}_1$ .



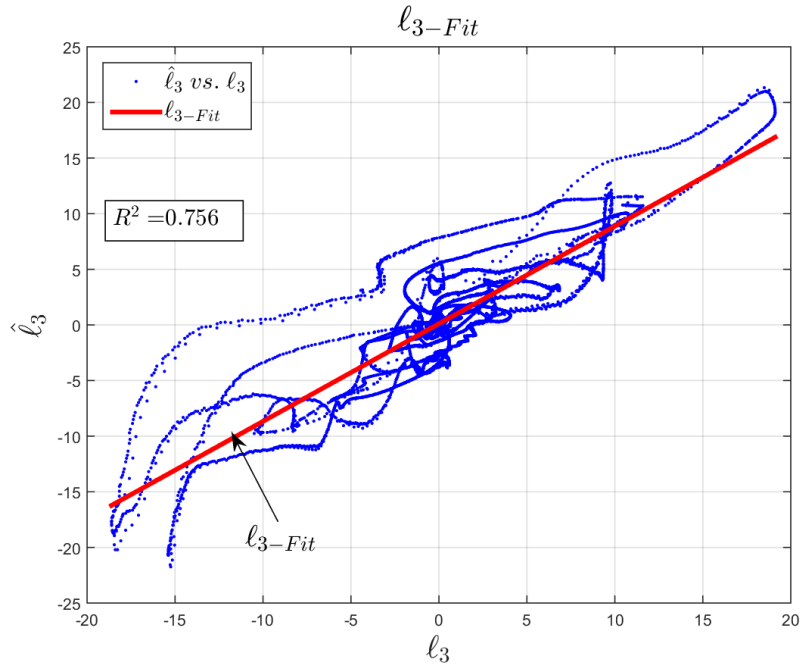
شكل 4.3 : المركبة الثانية  $l_2$  من الشعاع  $l$  والمركبة الثانية المقدرة  $\hat{l}_2$ .



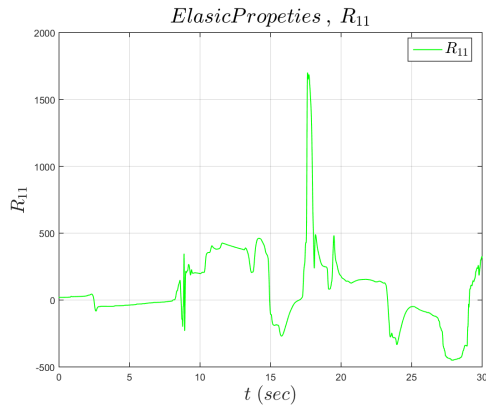
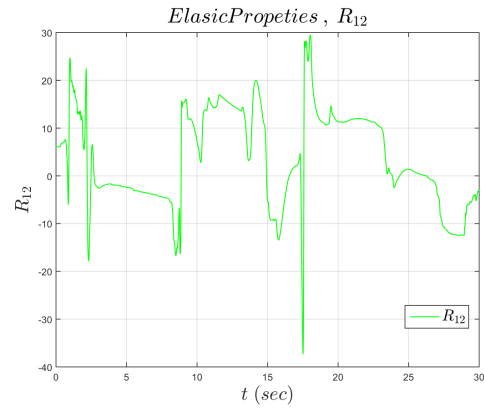
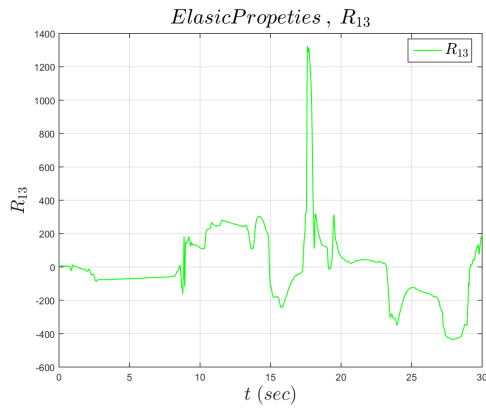
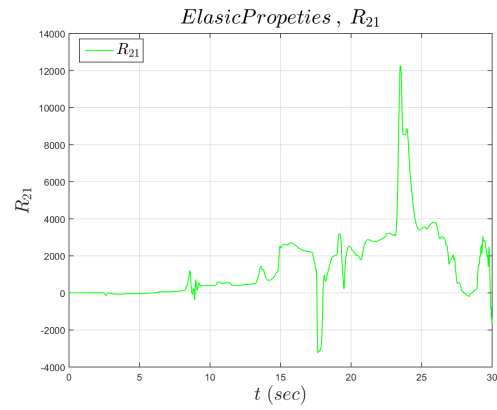
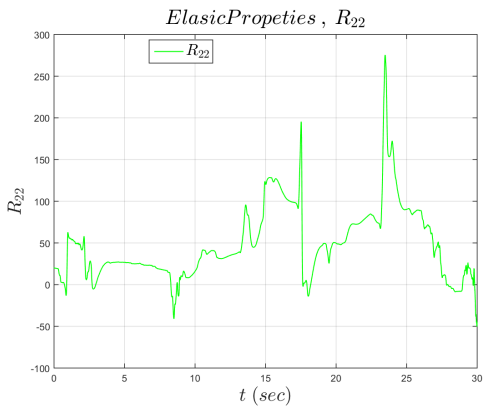
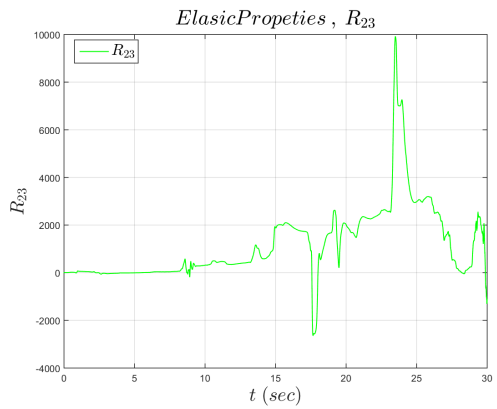
شكل 5.3 : العلاقة الخطية بين المركبة الثانية  $l_2$  من الشعاع  $l$  والمركبة الثانية المقدرة  $\hat{l}_2$ .



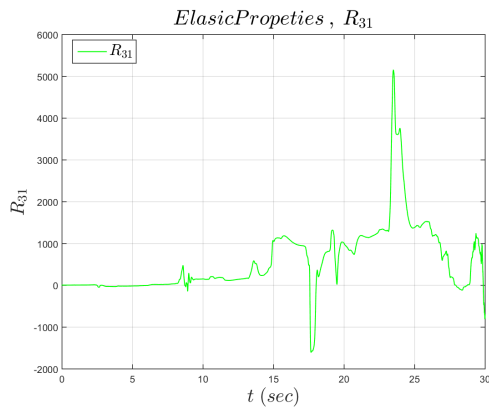
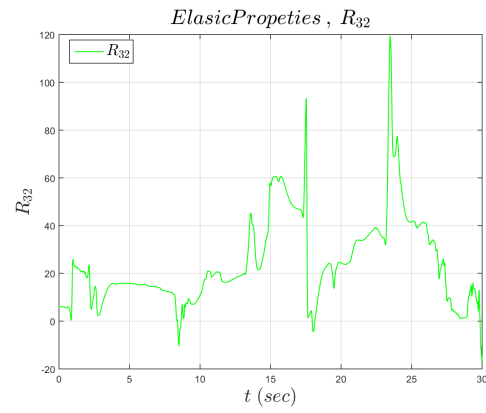
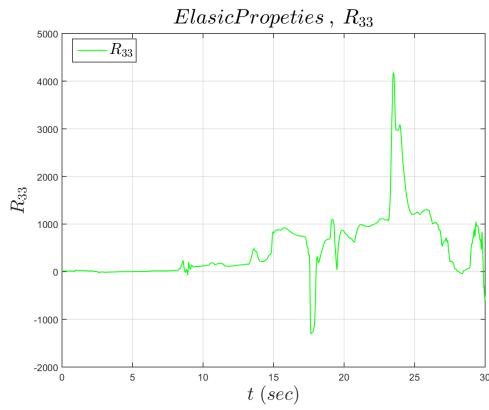
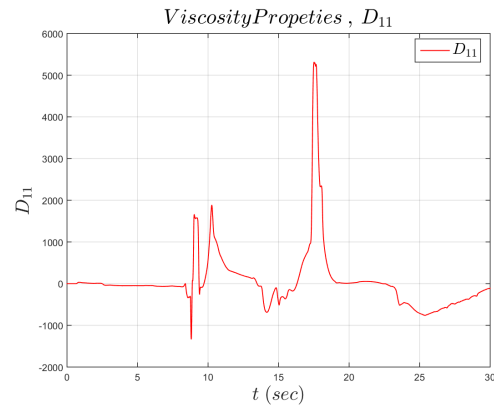
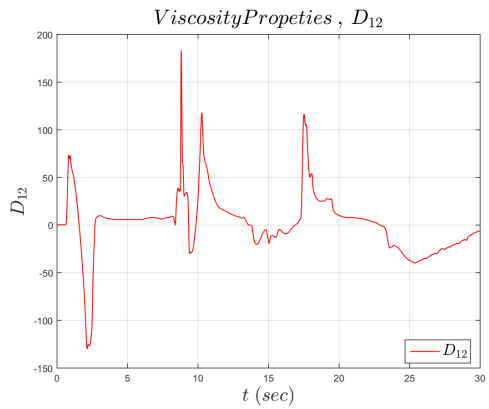
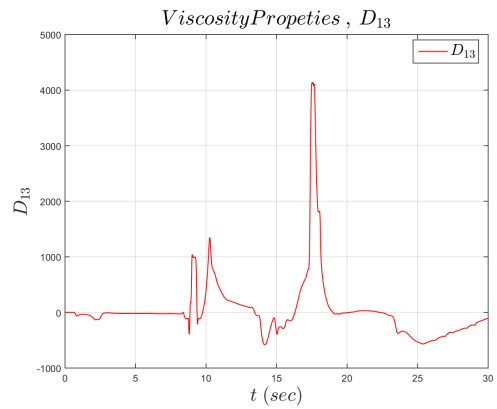
شكل 6.3 : المركبة الثالثة  $l_3$  من الشعاع  $l$  والمركبة الثالثة المقدرة  $\hat{l}_3$ .



شكل 7.3 : العلاقة الخطية بين المركبة الثالثة  $l_3$  من الشعاع  $l$  والمركبة الثالثة المقدرة  $\hat{l}_3$ .

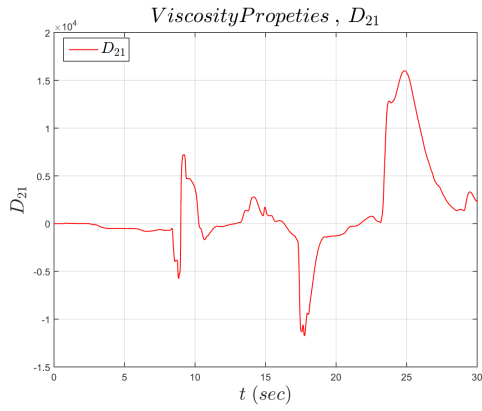
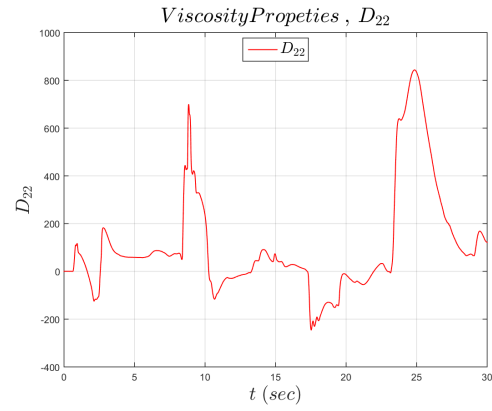
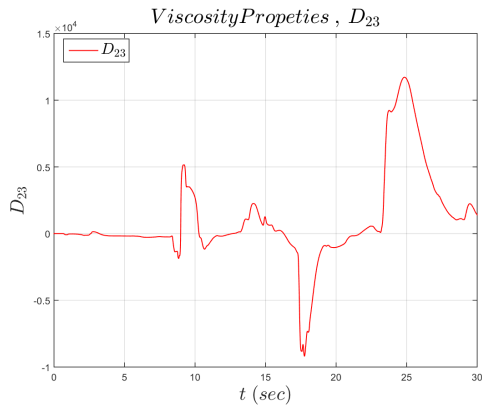
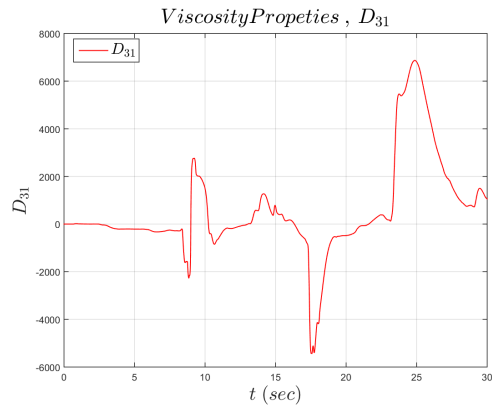
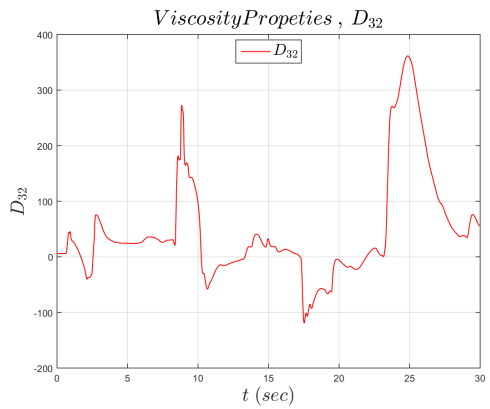
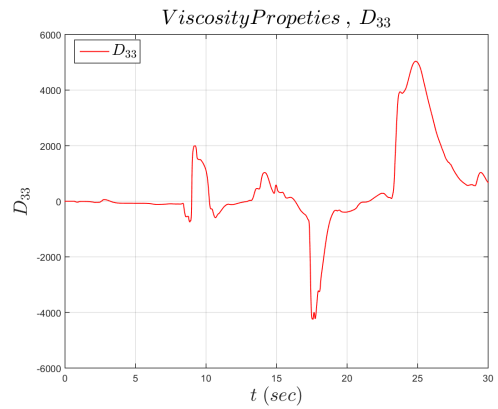
(a)  $R_{11}$ (b)  $R_{12}$ (c)  $R_{13}$ (d)  $R_{21}$ (e)  $R_{22}$ (f)  $R_{23}$ 

شكل 8.3 : خواص ذراع السائق اللزجة المرنة المتغير مع الزمن (القسم الأول)

(a)  $R_{31}$ (b)  $R_{32}$ (c)  $R_{33}$ (d)  $D_{11}$ (e)  $D_{12}$ (f)  $D_{13}$ 

شكل 9.3 : خواص ذراع السائق اللزجة المرنة المتغير مع الزمن (القسم الثاني)



(a)  $D_{21}$ (b)  $D_{22}$ (c)  $D_{23}$ (d)  $D_{31}$ (e)  $D_{32}$ (f)  $D_{33}$ 

شكل 10.3 : خواص ذراع السائق اللزجة المرنة المتغير مع الزمن (القسم الثالث)

وقمنا بتقدير الخواص اللزجة المرنة لنموذج ذراع السائق ذو ثلاث درجات حرية من خلال قياسات عملية لدرجة حرية واحدة (درجة حرية دورانية للمقود) محصلة عن طريق مقلد قيادة، أظهرت النتائج العملية قدرة الطريقة المقترحة على تقدير الخواص المرنة اللزجة للذراع بكفاءة جيدة.

## الفصل 4

# النتائج والآفاق المستقبلية

### 1.4 النتائج

قمنا في هذه الأطروحة بعرض دراسة مرجعية عن طرق النمذجة والتحكم بذراع السائق بهدف التحكم بنظام القيادة المساعدة EPAS، وقمنا بعرض دراسة لفهم آلية عمل العضلات، وقمنا بشرح بنية ذراع الإنسان العظمية، وناقشنا عدد درجات الحرية الأصغرية اللازمة لجعل حركة ذراع آلي تشابه حركة ذراع الإنسان قدر الإمكان. قمنا بدراسة كل من النموذج الهندسي المباشر والنموذج الهندسي العكسي لنموذج الذراع، كما قمنا بإيجاد كل من النموذج التفاضلي والنموذج الديناميكي للذراع الآلي.

اختبرنا بعد ذلك العزم الذي يولده نموذج الذراع في وضع التوازن عن طريق المحاكاة في بيئة Simulink ضمن برنامج Matlab، ووضحنا دور تفعيل العضلات MA الأساسي في التحكم بالعزم الذي تولده الذراع، كما قمنا بتصميم متحكم صلد لنموذج الذراع يعوض مساهمة تفعيل العضلات، وقمنا بالتحقق من النموذج الناتج في الحلقة المغلقة مع نموذج السيارة في بيئة Simulink ضمن برنامج Matlab. ثم تحققنا من صحة النموذج باستخدام معطيات عملية تم جمعها من مقلد قيادة، وناقشنا تأثير القوى اللاخطية على العزم الكلي لنموذج الذراع، ووضحنا بأن هناك جزء من العزم الذي تولده الذراع لا يفيد في تدوير المقود بالرغم من الوصول لزاوية المقود المطلوبة.

قمنا بإجراء دراسة مرجعية عن طرق مطابقة الخواص اللزجة المرنة، ثم قمنا بصياغة مسألة المطابقة على شكل مسألة خطية. قمنا ببناء نموذج للمطابقة في بيئة Simulink ضمن برنامج Matlab لحل مسألة المطابقة. وقمنا بتقدير الخواص اللزجة المرنة لنموذج ذراع السائق ذو ثلاث درجات حرية من خلال قياسات عملية لدرجة حرية واحدة محصلة عن طريق مقلد قيادة.

## 2.4 الآفاق المستقبلية

يمكن تطوير العمل وتحسينه مستقبلاً على عدة أصعدة. زيادة عدد درجات حرية للنموذج المستخدم للذراع بحيث يحاكي بشكل أدق حركة الذراع الحقيقية، مواصلة العمل وإجراء تحليل دقيق ومعمق لنتائج المطابقة التي تم الحصول عليها، كما من الممكن تطوير خوارزميات مطابقة لاختية ومقارنة نتائجها مع النتيجة التي تم الحصول عليها. تطوير طريقة تسمح بتوليد العزم المساعد بناءً على الخواص المرنة اللزجة للذراع السائق. بناء مقلد للقيادة يسمح بالتحقق عملياً وبالزمن الحقيقي من الخوارزميات المقترحة.

## المراجع

- [1] C.Sentouh, P.Chevrel, F.Mars, and F.Claveau. A human-centred approach of steering control modelling. *Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes*, 2009.
- [2] Naser Mehrabi. *Dynamics and Model-Based Control of Electric Power Steering Systems*. Phd thesis, University of Waterloo, 2014.
- [3] L. Bainbridge. Ironies of automation. *Automatica*, 19:775–779, 1983.
- [4] J.Ph.Lauffenburger, M.Basset, F.Coffin, and G.L.Gissinger. Driver-aid system using path-planning. *Control Engineering Practice*, 11:217–231, 2003.
- [5] M.A.Goodrich and E.R.Boer. Designing human-centred automation: Tradeoffs in collision avoidance. *IEEE Tran. On Intelligent Transportation Systems*, 1:40–54, 2000.
- [6] A.Marouf, P.Pudlo, C.Sentouh, and M.Djemaï. Investigation of the driver’s arm viscoelastic properties during steering vehicle maneuver. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 47(6):1030 – 1036, 2017.
- [7] A.Pick. *Neural muscular dynamics and the vehicle steering task*. Phd thesis, University of Cambridge, Department of Engineering, Cambridge, 2005.
- [8] A.Marouf. *Contribution à la Commande du Système de Direction Assistée Electrique*. Phd thesis, Université de Valenciennes, 2013.
- [9] A.Marouf, P.Pudlo, C.Sentouh, and M.Djemaï. A new control strategy of an electric-power-assisted steering system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(8): 3574–3589, 2012.
- [10] L.Saleh, P.Chevrel, F.Mars, J.F.Lafay, and F. Claveau. Human-like cybernetic driver model for lane keeping. In *Proceedings of the 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC '11)*, Milan, Italy, September 2014.

- 
- [11] Kandel, E.R.Schwartz, and J.H.Jessell. *Principles of Neural Science*. 2000.
- [12] A. Huxley. Muscle structure and theories of contraction. *Prog. Biophysics and Biophysical Chemistry*, pages 255–318, 1957.
- [13] T. McMahon. *Muscles, Reflexes and Locomotion*. 1984.
- [14] Zhang and L.Rymer. Simultaneous and nonlinear identification of mechanical and reflex properties of human elbow joint muscles. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 44:1192–1209, 1997.
- [15] N. Hogan. Adaptive control of mechanical impedance by co-activation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 29:681–690, 1984.
- [16] A. Hill. The heat of shortening and dynamic constants of muscle. *Proceedings of the Royal Society London*, 76:136–195, 1938.
- [17] D. Wilkie. The mechanical properties of muscle. *British Medical Bulletin*, 12:117–182, 1956.
- [18] Mains and R.E.Soechting. A model of the neuromuscular response to sudden disturbances. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, pages 247–251, 1971.
- [19] D. Winter. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. 1990.
- [20] Basmajian J.V. and DeLuca C.J. *Muscles Alive: Their Functions Revealed*. 1985.
- [21] R.Paassen. A model of the arm’s neuromuscular system for manual control. *ScienceDirect*, IFAC Proceedings 28:599–604, 1995.
- [22] D.T. McRuer, R.E. Magdaleno, and G.P. Moore. A neuromuscular actuation system model. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, 9:1968, 61-71.
- [23] Soechting J.F.and Stewart P.A., Hawley R.H., Paslay P.R., and Duffy J. Evaluation of neuromuscular parameters describing human reflex motion. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, pages 221–226, 1971.
- [24] Bennett D.J.and Hollerbach J.M, Xu Y., and Hunter I.W. Time-varying stiffness of human elbow joint during cyclic voluntary movement. *Experimental Brain Research*, 88:433–442, 1992.

- 
- [25] Mashima H, Akazawa K, Kushima H, and Fujii K. The force-load-velocity relation and the viscous-like force in the frog skeletal muscle. *Jpn J Physiol*, 22:103–120, 1972.
- [26] T.Kashima and Y.Isurugi. Trajectory formation based on physiological characteristics of skeletal muscles. *Biol. Cybern*, 78:413–422, 1998.
- [27] R.Hess. Analysing manipulator feel and system effects in aircraft flight. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20:923–931, 1990.
- [28] D.J.Bennett. Torques generated at the human elbow joint in response to constant position errors imposed during voluntary movements. *Experimental Brain Research*, 95:488–498, 1993.
- [29] Uno Y, M. Kawato, and R. Suzuki. Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement. *Biological Cybernetics*, 61:89–101, 1989.
- [30] Soechting JF, Dufresne JR, and Lacquaniti F. Time-varying properties of the myotatic response in man during some simple motor. *Neurophysiol*, 46:1226–1243, 1981.
- [31] MacNeil JB and Kearney RE and Hunter IW. Identification of time-varying biological systems from ensemble data. *IEEE Trans*, 39:1213–1225, 1992.
- [32] N.Hogan. An organizing principle for a class of voluntary movements. *The Journal of Neuroscience*, 4:2745–2754, 1984.
- [33] B.E.M.Abend. Human arm trajectory. *Brain*, 105:331–348, 1982.
- [34] P.Morasso. Spatial control of arm movements. *Exp Brain Res*, 42:223–227, 1981.
- [35] ZhiWei Luo Shigeyuki Hosoe Rafael Laboissière Ken Ohta, Mikhail M. Svinin. Optimal trajectory formation of constrained human arm reaching movements. *Biol. Cybern*, 91:23–36, 2004.
- [36] Krendel McRuer. The human operator as a servo system element part ii. *Journal of the Franklin Institute*, 267:511–536, 1959.
- [37] Krendel McRuer. The man-machine system concept. *Proceedings of the IRE*, pages 1117–1123, May 1962.
- [38] R.S. Sharp and V. Valtetsiotis. Optimal preview car steering control. *Vehicle System Dynamics Supplement*, 35:101–117, 2001.

- 
- [39] S.D.Keen. *Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control*. Phd thesis, University of Cambridge, 2008.
- [40] AY.Ungoren and H.Peng. An adaptive lateral preview driver model. *Vehicle System Dynamics*, 43:245–259, 4 2005.
- [41] C.C. MacAdam. An optimal preview control for linear systems. journal of dynamic systems. *Measurement and Control*, 102:188–190, Sept 1980.
- [42] Sharp R.S., Casanova D., and Symonds P. A mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance results. *Vehicle System Dynamics*, 33: 289–326, 5 2000.
- [43] K. Guo and H. Guan. Modelling of driver vehicle directional control system. *Vehicle System Dynamics*, 22:141–184, 1993.
- [44] C.C. MacAdam. Application of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 11, June 1981.
- [45] H. Peng. Evaluation of driver assistance systems - a human centred approach. *AVEC*, 2002.
- [46] D.H. Weir and D.T. McRuer. Dynamics of driver vehicle steering control. *Automatica*, 6:87–98, 1970.
- [47] Tousi S., Bajaj A.K., and Soedel W. Finite disturbance directional stability of vehicles with human pilot considering nonlinear cornering behaviour. *Vehicle System Dynamics*, 20:21–55, 1991.
- [48] R.S. Sharp. Some contemporary problems in road vehicle dynamics part c. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 214:137–148, 2000.
- [49] R.S.Sharp. Driver steering control and a new perspective on car handling qualities. *Proceedings of IMechE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* *Proceedings of IMechE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 219:1041–1051, 2005.
- [50] Bruno Siciliano and Oussama Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. Springer-Verlag, 2008.
- [51] Bruno Siciliano, Carlos Canudas de Wit, and Georges Bastin. *Theory of Robotic Control*. Springer-Verlag, 1996.
-



- 
- [52] Richard M. Murray, Zexiang Li, and S. Shankar Sastry. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.
- [53] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, and Giuseppe Oriolo. *Robotics Modelling, Planning and Control*. Springer, 2009.
- [54] A.Marouf, P.Pudlo, C.Sentouh, and M.Djemaï. Identification of human arm viscoelastic properties during vehicle steering maneuver. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2014.
- [55] J.Perreault, F. Kirsch, and E. Crago. Multijoint dynamics and postural stability of the human arm. *Exp Brain Res*, 157:507–517, 2004.
- [56] M.Kawato H.Gomi. Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement. *Biological Cybernetics*, 76:163–171, 1997.
- [57] Mussa-Ivaldi, N.Hogan, , and E.Bizzi. Neural, mechanical and geometric factors subserving arm posture in humans. *Journal of Neuroscience*, 5:2732–2743, 1985.
- [58] J.M. Dolan, M.B.Friedman, and M.L.Nagurka. Dynamic and loaded impedance components in the maintenance of human arm posture. *EEE Trans Syst Man Cybern*, 23: 698–709, 1993.
- [59] Y.Xu and J.Hollerbach. A robust ensemble data method for identification of human joint mechanical properties during movement. *IEEE Trans on Biomed Eng*, 46: 409–419, 1999.
- [60] M.Mulder, T. Verspecht, D.A.Abbink, M.M.van Paassen, A. Schouten, and E.de Vlugt. Identification of time variant neuromuscular admittance using wavelets. In editor, editor, *2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2011.
- [61] Y. Tanaka, T. Onishi, T. Tsuji, and N. Yamada. Analysis and modeling of human impedance properties for designing a human-machine control system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, page 3627–3632, 2007.
- [62] Y.Kashiba, Y.Tanaka, T.Tsuji, N.Yamada, and T.Suetomi. Analysis of human hand impedance properties depending on driving conditions. *5th International Workshop on Computational Intelligence and Applications Proceeding*, page 88–93, 2009.

- [63] T.Tsuji and M.Kaneko. Estimation and modeling of human hand impedance during isometric muscle contraction. *In Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, 56:575–582, 1996.
- [64] S.Sastry and M.Bodson. *Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs,NJ, 1987.
- [65] G.C.Goodwin and S.K.Sin. *Adaptive Filtering Prediction and Control*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs,NJ, 1984.
- [66] L.Ljung and T.Soderstrom. *Theory and Practice of Recursive Identification*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, England, 1983.