الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
الكلية التطبيقية

مقرر أنظمة الروبوت

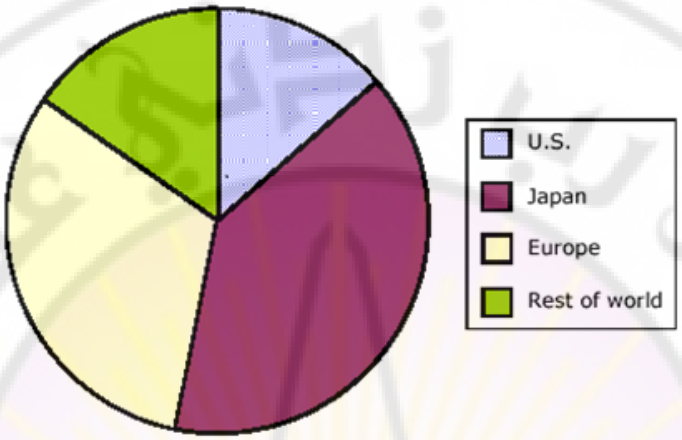
السنة الرابعة-قسم الميكاترونكس

إعداد الدكتور المهندس جورج الحنون

مقدّمـــة

علم الروبوتيك هو من العلوم التي تهدف إلى تصميم وتمثيل وقيادة الأنظمة الميكانيكية المتمفصلة، وهو علم تكاملي يجمع بين الميكانيك والمعلوماتية والهندسة الصناعية والذكاء الصناعي والإلكترون.

إن علم الروبوت على المستوى العالمي هو حقل نشط للغاية في جميع أنحاء العالم، فاليابان وكوريا تقود في مجال تكنولوجيا الروبوتات المتنقلة، وروبوت الإنسالة (الشبيه بالإنسان) وبعض جوانب الخدمة والروبوتات الشخصية (بما في ذلك الترفيه)، والولايات المتحدة تقود عدة مجالات للروبوتات منها روبوتات الملاحة، وهندسة الروبوت، وتطبيقات الروبوتات في نظم الفضاء والدفاع وتحت الماء وبعض جوانب الخدمة والروبوتات الشخصية، وتتصدر أوروبا الروبوتات المتنقلة في مجال التشييد والبناء إضافة إلى ذلك قطاع النقل المدني ولديها أيضا برامج هامة في رعاية المسنين لذلك تدعم الروبوتات في مجال الخدمة المنزلية. في (الشكل ١) مقارنة عالمية لإنتاج الروبوتات الصناعية لعام / ٢٠٠٤/ تظهر تفوق اليابان، أما من الناحية الاقتصادية فتم تقدير الأموال المصروفة في نفس العام على إنتاج الروبوتات عالمياً (٢٤٤٣) مليون دولار [١]. أما بالنسبة للعالم العربي فإن نسبة المشاركة في هذا المجال تكاد تكون معدومة.



Industrial Robots installed wordwide 2004

الشكل ١: مقارنة عالمية لإنتاج الروبوتات الصناعية

تصنيف أنظمة الروبوت

١-**تبعا لنوع النظام:** نظام نقطة إلى نقطة (Point to point) و نظام الطريق المستمر.

٢-**تبعا للشكل الهندسي لنظام الروبوت** : نظام ديكارتي – أسطواني – كروي أو مفصلي .

٣-**تبعا لنوع دارات التحكم** : الدارة المفتوحة – الدارة المغلقة.

٤-**تصنيف الروبوتات بحسب التطبيق.**

٥-**تصنيف الروبوتات بحسب التموضع .**

إن اختيار نوع النظام ودارات التحكم يعتمد على خصوصية التطبيق.

١ـ **تبعاً لنوع النظام**: نظامي النقطة نقطة (PTP) و المسار المستمر (Continuous path)

- نظام النقطة نقطة (PTP) إن أي شخص لا يملك الخبرة بالروبوت يمكن أن يعتقد أن روبوت لحام النقطة هو نفسه روبوت لحام القوس و لكن بتجهيزات مختلفة ، ولكن في الواقع هما أنظمة روبوتية مختلفة. إن التحكم بروبوت لحام النقطة يعتمد على عملية من نقطة إلى نقطة و لا ينصح به لإنجاز لحام الأقواس الذي يحتاج لنظام الطريق المستمر .

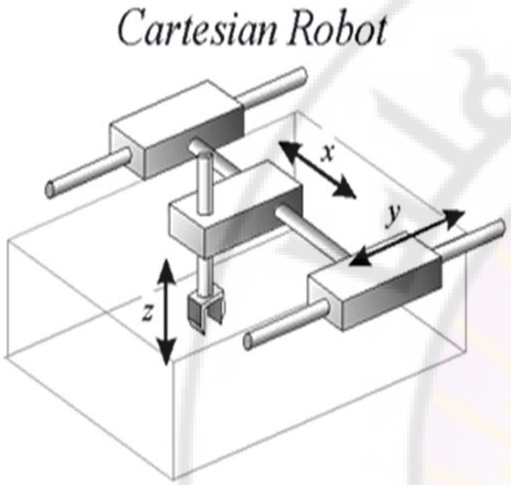
- هناك نوعين أساسيين من أنظمة (PTP) الروبوتية :

الأول: كل محور ينتقل من نقطة إلى أخرى بأقصى سرعة ممكنة و لهذا فإن المسار من نقطة البداية إلى نقطة النهاية لا يتم التحكم به.

الثاني: يطبق في نظام (PTP) الأكثر تطوراً حيث تنتهي الحركة في جميع المحاور في لحظة واحدة في هذا النظام.

- أنظمة روبوت المسار المستمر(CP=Continuous path): في روبوتات الطريق المستمر تقوم الأداة بإنجاز مهمتها في الوقت التي تتحرك فيه محاور الحركة معاً كما يحدث في لحام الأقواس إن مهمة الروبوت في لحام الأقواس هي توجيه رأس اللحام على طول المسار الموضوع سابقا في روبوتات (CP).

٢- تبعاً للشكل الهندسي للروبوت



٢-١- الروبوتات الديكارتية (Cartesian robot).

٢-٢- الروبوتات الاسطوانية (Cylindrical robot).

٢-٣- الروبوتات الكروية أو القطبية (Spherical Polar robot).

٢-٤- الروبوتات الدورانية أو المتمفصلة.

٢-٥- الروبوتات الشبيهة بالأفعى أو ذات الذراع.

٢-١) الروبوتات الديكارتية (PPP):

تتألف من ثلاث حركات خطية متعامدة على طول محاور اتصالها و يتم إنجاز أفضل وثبات ضمن مساحة عمل الروبوت.

المزايا: ثبات عالي و دقة كبيرة. سهولة التحكم بحركة الوصلات.

المساوئ: الهيكل التركيبي ضخم.

انحسار الانسجام مع أنظمة الروبوتات الأخرى في مجال العمل العادي.

حاجتها إلى مساحة أرضية واسعة.

٢-٢) الروبوتات الاسطوانية (PRP):

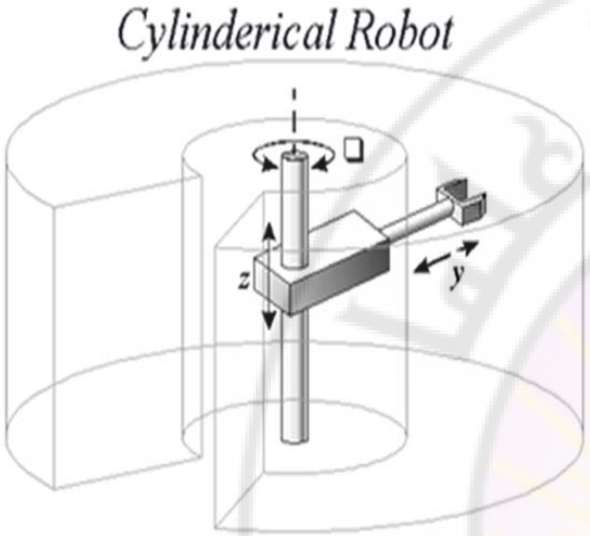
تتألف هذه الروبوتات عادة من حركتين خطيتين متعامدتين و حركة دورانية .

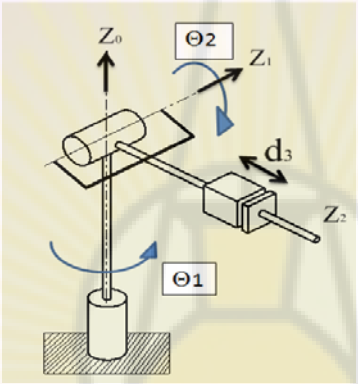
المزايا:

- ❖تأثير قوى الجاذبية منخفض.
- ❖إن وجود محورين خطيين يجعل من التصميم الميكانيكي أقل تعقيدا من الروبوتات الديكارتية.

المساوئ:

- ❖الهيكل كبير.
- ❖قلة الانسجام مع مناولات أخرى في مجال العمل العادي.
- ❖دقة و ثبات أقل بالمقارنة مع الروبوتات الديكارتية.





٢-٣) الروبوتات الكروية أو القطبية (RPR) :

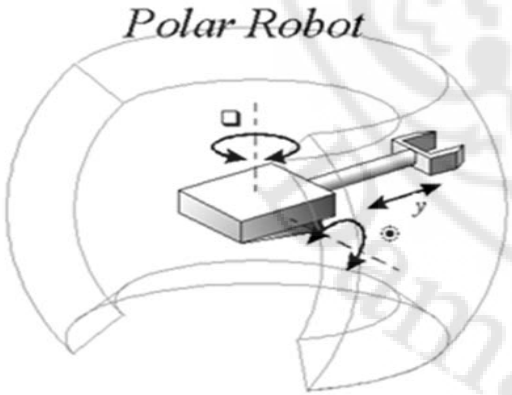
تتألف هذه الروبوتات من حركتين دورانيتين رئيسيتين و حركة انزلاقية واحدة بشكل أساسي

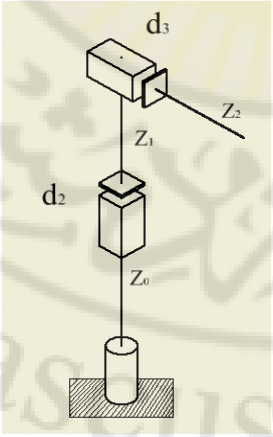
المزايا:

- ❖وزن خفيف و درجة تعقيد قليلة في الهيكل .
- ❖ثبات جيد.
- ❖الانسجام مع روبوتات و آلات في مجال العمل العادي .

المساوئ:

- ❖عزوم التدوير المتغيرة الكبيرة تخلق مشكلة توازن .
- ❖خطا التموضع كبيرا بسبب الحركة الدورانية.





٢-٤) الروبوتات الدورانية أو المتمفصلة

يتألف الروبوت المتمفصل من مفاصل دورانية تؤمن دوران القاعدة والمحورين الآخرين، ويستخدم هذا النوع من الروبوتات بشكل واسع في الصناعة لما يتميز به من مرونة عالية وإمكانية استخدامه مع بيئة روبوتات متعددة.

المزايا:

- مرونة الوصول إلى نقاط حرجة في المشغولات يصعب على الروبوتات الأخرى الوصول إليها.
- الانسجام مع الروبوتات الأخرى التي تعمل بنفس مساحة العمل العادية.

المساوئ:

- قلة الثبات و الدقة.
- مشكلة في التوازن نتيجة لعزوم التدوير الضخمة و المتغيرة.
- القدرة المحدودة على تجنب العوائق.
- وجود الاهتزازات.

٢-٥) الروبوتات الشبيهة بالأفعى

تستطيع هذه الأذرع الروبوتية أن تأخذ أي شكل في فراغ ثلاثي الأبعاد وهكذا فإنها تتألف من عناصر كثيرة.

٣- تبعاً لنوع دارات التحكم بالأنظمة الروبوتية

إن أنظمة التحكم يمكن أن تكون وفق دارة مفتوحة أو دارة مغلقة.

- **في الدارة المفتوحة** النتيجة لا تؤثر على المعطيات (لا يوجد ترابط بين الخرج والدخل) وكمثال على نظام الدارة المفتوحة، نفترض أن هناك جهد ثابت (فولط) يطبق على محرك كهربائي باستمرار إن الخرج هو سرعة دوران المحرك والجهد المطبق هو الدخل. إن تحميل المحرك سوف يسبب تناقص في سرعته. إن هذا الوضع لا يمكن إصلاحه طالما أن جهد الدخل لا يتأثر بتغيرات السرعة وسيكون لدينا نظام أفضل فيما إذا تم قياس الخرج.
- إن الأنظمة التي يؤثر فيها الخرج على الدخل للعنصر الذي يتم التحكم فيه تدعى **أنظمة الدارة المغلقة**. كل محور حركة لذراع الروبوت يتم تشغيله بشكل منفصل من خلال دارة التحكم التي تحتوي على عنصر قيادة. في أنظمة الدارة المغلقة يتم تحسس الحركة الناشئة بواسطة إشارة تغذية مرتدة. إن القيادة المحورية يمكن أن تكون عن طريق محرك DCأو نظام هيدروليكي أو اسطوانة هوائية ويتم تحديد النوع بشكل أساسي استنادا إلى الدقة و الاستطاعة المطلوبتين من الروبوت.

هناك العديد من أنواع الروبوتات وإلى الآن لا يوجد تصنيفاً محدداً لها، فمنهم من يصنفها بحسب الحجم ومنهم من يصنفها بحسب النوع أما استخداماتها فهي متعددة ولا يمكن حصرها، فمنها الصناعية والتعليمية والحربية والفضائية والبحرية والتي تحاكي الإنسان مثل أسيمو وناو، وهناك العديد والعديد من الروبوتات الأخرى.

نستنتج من ذلك أن الروبوت قد احتل معظم المجالات التقنية والفنية بل وحتى الخدمية ، ومن المهم جدا التعرف على هذه التقنية حتى نساهم في انتشارها.

كثيرا منا لا يعرف الفرق بين مصطلح Robot ومصطلح Robotics فالروبوت Robot هو آلة تتحرك أوتوماتيكيا بأوامر بشرية لتنفيذ مهمة معينة، أما علم الروبوت (Robotics) فهو علم هندسة وتصميم وصناعة وتطبيقات، ويجمع هذا العلم ثلاث جوانب رئيسية وهي : الميكانيكا ، الالكترونيات و البرمجة، ولذلك فقد دخل علم الروبوتيك في مراحل التعليم المبكرة لكثير من الدول الغربية ولكن وإلى الآن لم يصل إلينا هذا العلم بل وصل إلينا الروبوت كجهاز فقط واستخدم في الكثير من المسابقات المقامة في الدول العربية وهو ما يدفعنا لتبصير المجتمع بهذه التقنية الجبارة والسلسة في نفس الوقت.

٤ـ تصنيف الروبوتات بحسب التطبيق

- الروبوتات الصناعية (Industrial robots).
- الروبوتات المنزلية (Domestic or household robots).
- الروبوتات الطبية (Medical robots).
- روبوتات الخدمة (Service robots).
- الروبوتات العسكرية (Military robots).
- روبوتات الترفيه والألعاب (Entertainment robots).
- روبوتات الفضاء (Space robots).
- روبوتات الإنسالة (Hobby and competition robots).

٥ـ تصنيف الروبوتات بحسب الحركة والتموضع

الروبوتات الثابتة (Stationary robots).

- الروبوتات الديكارتية (Cartesian/Gantry robots).
- الروبوتات الأسطوانية (Cylindrical robots).
- الروبوتات الكروية أو المتمفصلة (Spherical robots).
- روبوتات نوع سكارا (SCARA robots).
- الرجال الآليون (Articulated robots).
- روبوتات التوازي (Parallel robot).

روبوتات العجلات (Vehicles robots).

- روبوتات بعجلة واحدة (Single wheel (ball) robots).
- روبوتات بعجلتين (Two-wheel robots).
- روبوتات بثلاث عجلات وأكثر (Three and more wheel robots).

رجال آليون ذوات الأرجل (Legged robot).

- ثنائيو الأقدام (Bipedal robots).
- ثلاثيو الأقدام (Tripedal robots).
- رباعيو الأرجل (quadrupedal robots).
- سداسيو الأرجل (hexapod robots).
- عدد كبير من الأرجل (other number of legs).

روبوتات السباحة (Swimming robots).

الروبوتات الطائرة (Flying robots).

الروبوتات الكروية النقالة (robotic balls) (Spherical robots

سرب الروبوتات (Swarm robots).

روبوتات أخرى (Others).

Damascus University

مركبة تحت الماء مستقلة

روبوت يعمل بالطاقة الشسية اميركا

(a)

(b)

Figure 2.3. مركبة زراعية روبوتية (Int Harv, U.S.) (a)شاحنة للعمل بالمناجم(ACFR, Australia) (b).

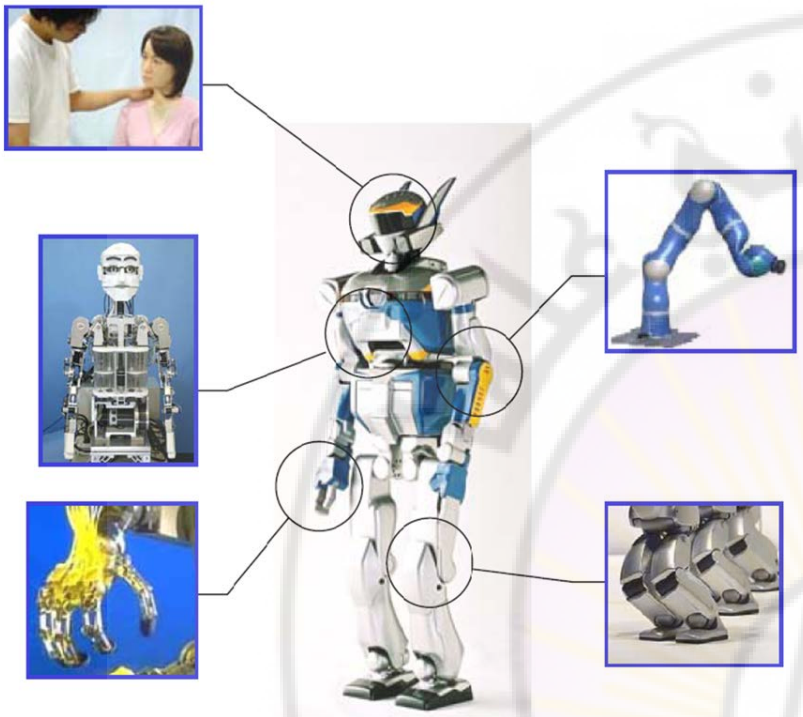


Figure 4.3. تشريح إجمالي للإنسالة

Figure 7.2. Robotic modules can be reconfigured to "morph" into different locomotion systems including a wheel-like rolling system (left), a snake-like undulatory locomotion system (right), a four-legged walking system (bottom).

موديلات روبوتية ممكن إعادة تشكيلها إلى مجموعات مختلفة (دائرية - على شكل ثعبان - مجموعة تسير على اربعة ارجل).

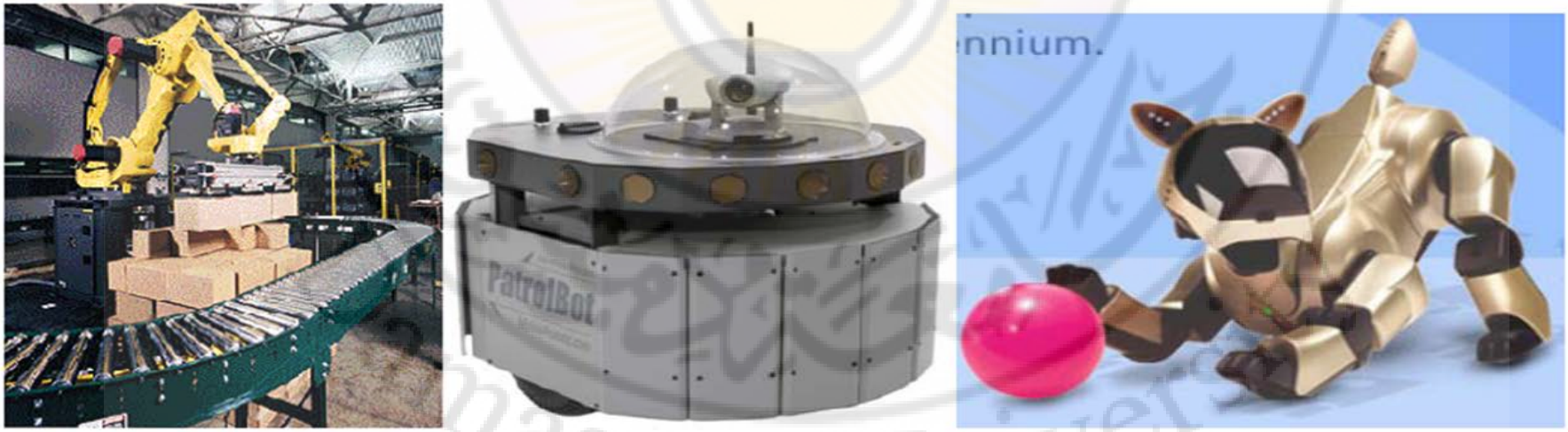


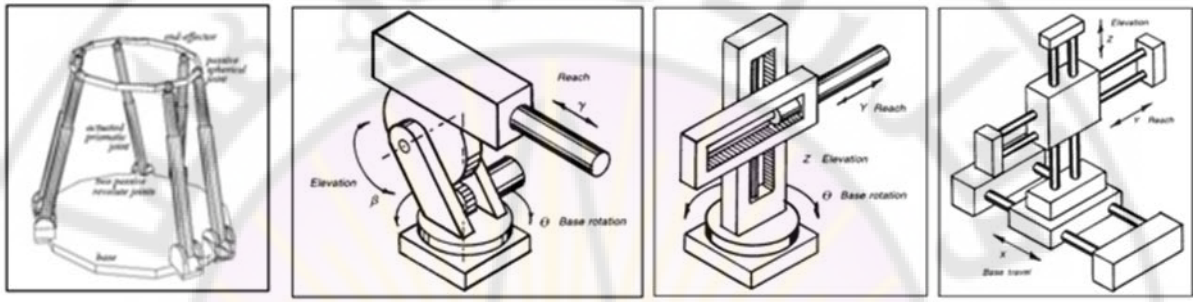
Figure 5.1. Examples of robots. A FANUC industrial robot (left), a service robot used for security made by Mobile Robotics (center), and a personal entertainment robot made by Sony (right).

أمثلة عن الروبوتات - روبوت صناعي نوع فانوس - روبوت للخدمة - روبوت للترفيه الشخصي

إن التطبيقات الصناعية للروبوت شهدت تطوراً كبيراً بدخولها لمجالات عديدة، نذكر منها **أنظمة التصنيع المرنة** التي يمكن تعريفها على أنها منظومة إنتاج متكاملة تتضمن آلات تصنيع مبرمجة وروبوتات صناعية حيث يقوم الروبوت بتغذية الآلات بمشغولات ويستلم القطع المشغلة أي يكون مسؤولا عن عمليات النقل والتحميل بين الآلات والمستودعات، وتضم هذه الأنظمة آلات قياس مبرمجة للتأكد من جودة التصنيع، وأنظمة معلوماتية موزعة تعمل على التحكم ومراقبة عمل المكونات السابقة عبر شبكة اتصالات تسمح بتكامل المنظومة، ودعيت هذه الأنظمة بالمرنة لأنها قادرة على معالجة أنماط من القطع بشكل متزامن ضمن الورشة الواحدة وبكمية إنتاج قابلة للمعايرة حسب الطلب.

وتستعمل الروبوتات في مجال الصناعة لأغراض عديدة مثل (لحام المعادن - الأعمال الخطرة - التقاط ونقل الأجسام – مراقبة جودة أو صلاحية المنتج النهائي – أعمال الطلاء .....الخ). إن هذه الروبوتات مبرمجة لتنفيذ مهامها بصورة متكررة ودقيقة، تم لاحقا إضافة الرؤية الصناعية لهذه الروبوتات مما جعلها تتمتع بالاستقلالية في تنفيذ المهام المبرمجة وذلك من خلال قدرتها على فهم وتحليل الصور التي تستقبلها من كاميرا مثبتة على الروبوت.

ويمكن ترتيبها بحسب البناء الميكانيكي إلى أربعة أنواع كما في (الشكل ٢):



-4- -3- -2- -1-

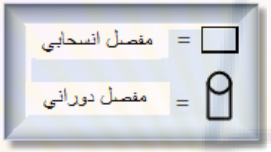
الشكل ٢: أنواع الروبوتات من حيث البناء الميكانيكي

إن أهم تطبيقات الروبوتات الصناعية تتجلى في إدخالها ضمن الخلايا الإنتاجية حيث أثبتت التجارب أن إضافة هذه الروبوتات أدى وبشكل ملحوظ:

- إلى زيادة في الطاقة الإنتاجية.
- استعمال التجهيزات بشكل فعال.
- تكاليف عمل منخفضة.
- القدرة على العمل في الظروف الخطرة.
- نوعية محسنة لأماكن العمل والإنتاج.
- عائدات استثمار جيدة.
- امتلاك الحرية في الحركة في الأبعاد الثلاثة للفراغ.
- الدقة في العمل.

تعاريف اساسية

- يتألف اي روبوت من مجموعة من الأجسام يربط بينها مجموعة من المفاصل ويمكن التعبير عن اي روبوت من خلال سلسلة حركية لوصفه.
- **الأجسام:** هي أجزاء الروبوت المختلفة.
- **المفاصل:** هي التي تربط بين اجسام الروبوت ولدينا نوعين من المفاصل (**مفاصل دورانية** تمثل بزاوية دوران- **مفاصل انسحابية** تمثل بانزياح) .



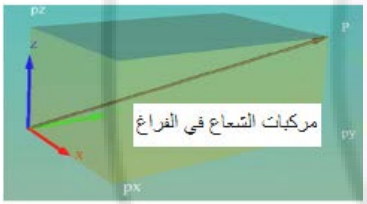
- **السلسلة الحركية:** هي عبارة عن مجموعة من الوصلات الحركية (مفاصل الروبوت).
- **الجسم الطرفي:** هو الجسم الأخير في الروبوت.
- **اليد الآلية:** تتكون اليد الالية من مجموعة من الأجزاء الصلبة مرتبطة مع بعضها البعض بمفاصل يمكن أن تكون دورانية أو انسحابية.
- **الوصلة:** هي عبارة عن قطعة صلبة تتميز بثوابتها الديناميكية والحركية .
- **الزوج الحركي:** يتألف من وصلتين حركيتين متصلتين بمفصل و يكون الزوج الحركي معبراً عن درجة حرية واحدة .
- **إحداثيات المفاصل:** يتم في المفاصل الدائرية تمثيل إحداثيات المفاصل بزاوية الدوران بينما في المفاصل المنزلقة (الإنسحابيه) فيتم فيها بالانزياح على المفصل، و يرمز لإحداثيات المفاصل بـالرمز $q = [q_1 , q_2 , \dots , q_n]$.

أنظمة المحاور الإحداثية

- **تمثيل الشعاع في جملة محاور إحداثية وحيدة {A}:**
- يتم تحديد موضع اي نقطة ولتكن النقطة (P) في الفراغ بمركباتها الثلاث وفق ما يلي:

$$\vec{P} = \left[P_x, P_y, P_z \right]$$

- إن هذه المركبات تمثل مساقط موضع هذه النقطة على المحاور الإحداثية (X,Y,Z) على التوالي، ويمكننا تمثيل ذلك بشعاع ($\vec{P}$) ينطلق من مركز جملة المحاور الإحداثية (XYZ) إلى النقطة P.



- يمثل هذا الشعاع عادة بالمركبات الشعاعية لمساقطه على المحاور الثلاثة ونعبر عن ذلك بالمعادلة: $\vec{P} = P_x\vec{i} + P_y\vec{j} + P_z\vec{k}$

وتعطى القيمة الجبرية للشعاع بالعلاقة: $P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}$

يعبر عن الشعاع ($\vec{P}$) بمصفوفة عناصرها هي مساقط الشعاع على المحاور الإحداثية:

$$^{A}P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

ولما كانت: $\vec{i} = [1,0,0] \quad \vec{j} = [0,1,0] \quad \vec{k} = [0,0,1]$

أشعة الوحدة القياسية وتمثل بمصفوفات وحدة قياسية أيضاً

بالتالي فإن عناصر مصفوفة الشعاع ($\vec{P}$) تكتب بالمعادلات التالية:

$$P_x = \left(\vec{P}, \vec{i}\right) = \vec{P} * \vec{i}$$

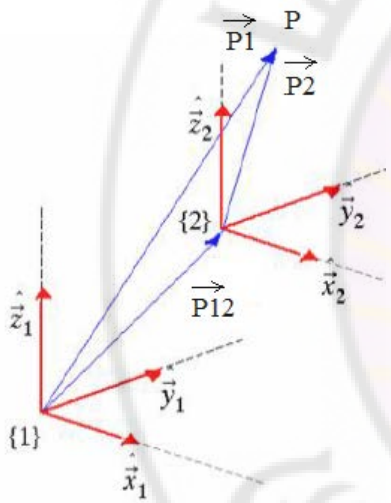
$$P_y = \left(\vec{P}, \vec{j}\right) = \vec{P} * \vec{j}$$

$$P_z = \left(\vec{P}, \vec{k}\right) = \vec{P} * \vec{k}$$

أنظمة المحاور الإحداثية

- **تمثيل الشعاع في جملتي محاور إحداثية مختلفتين:**
- النقطة (P) تمثل بالشعاع ($\vec{P}_1$) في الجملة الإحداثية $\{1\}$وبالشعاع ($\vec{P}_2$) في الجملة الإحداثية $\{2\}$.

بما ان نظامي المحاور الإحداثية ($\{1\}$ و $\{2\}$) لهما نفس التوجيه نجد:



$$\vec{P}_1 = \vec{P}_{12} + \vec{P}_2$$

حيث ان ($\vec{P}_{12}$) هو شعاع تحويل الموضع من جملة إلى جملة.

- **تمثيل الدوران:**

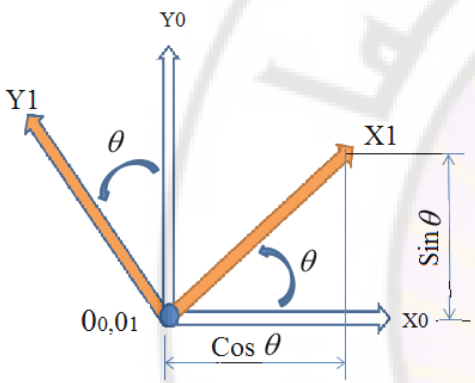
حتى نتمكن من تمثيل التوجيه والتموضع النسبي لجسم صلب بالنسبة

لجسم صلب آخر لا بد من ربط مستويات إحداثية (في الحالة ثنائية البعد) أو جمل إحداثية (في الحالة ثلاثية البعد) بكل جسم صلب، ومن ثم نجد العلاقات الهندسية بين المستويات أو جمل الإحداثيات .

تمثيل الدوران

x)التدوير ثنائي البعد (في المستوي) :

لتحديد زاوية الدوران (θ) نقوم بتحديد الاشعة الديكارتية لمحاور الجملة $(0_1\ X_1\ Y_1)$بالنسبة للجملة $(0_0\ X_0\ Y_0)$ وهذا يعطي مصفوفة الدوران $R_1^0 = \begin{bmatrix} x_1^0 & y_1^0 \end{bmatrix}$.



عناصر المصفوفة $x_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad y_1^0 = \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix}$

وبالتبديل نجد مصفوفة التدوير $R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$

- هناك طريقة بديلة وهي ان نبني مصفوفة التدوير بإسقاط محاور الجملة $(0_1\ X_1\ Y_1)$ على المحاور الديكارتية $(0_0\ X_0\ Y_0)$ ونحصل على

$$x_1^0 = \begin{bmatrix} x_1\,x_0 \\ x_1\,y_0 \end{bmatrix} \quad y_1^0 = \begin{bmatrix} y_1\,x_0 \\ y_1\,y_0 \end{bmatrix}$$

وبالجمع نحصل على

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} x_1.x_0 & y_1.x_0 \\ x_1.y_0 & y_1.y_0 \end{bmatrix}$$

أن أعمدة المصفوفة (R_1^0) تحدد التجيبات المباشرة للمحاور الإحداثية $(0_1\ X_1\ Y_1)$ بالنسبة للمحاور الإحداثية $(0_0\ X_0\ Y_0)$.

تمثيل الدوران

٢) التدوير ثلاثي البعد (الدوران في الفراغ):

إن كل محور من محاور الجملة $(0_1\ X_1\ Y_1)$ يتم اسقاطه على جملة المحاور الإحداثية $(0_0\ X_0\ Y_0)$

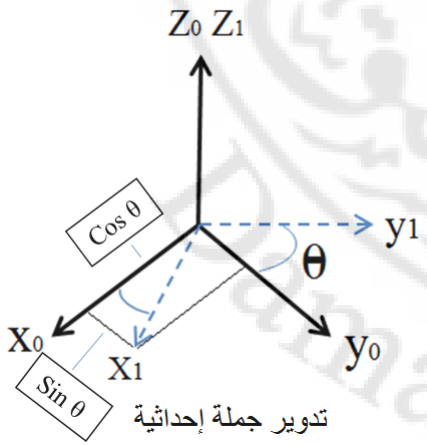
وتعطى مصفوفة التدوير الناتجة على الشكل التالي:

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} x_1.x_0 & y_1.x_0 & z_1.x_0 \\ x_1.y_0 & y_1.y_0 & z_1.y_0 \\ x_1.z_0 & y_1.z_0 & z_1.z_0 \end{bmatrix}$$

وهي مماثلة للمصفوفة في الحالة الثنائية إلا انها ثلاثية البعد.

مثال: لدينا جملة محاور إحداثية تدور بزاوية (θ) حول المحور (Z0)، والمطلوب إيجاد مصفوفة التدوير الناتجة (R_1^0).

إن قاعدة اليد اليمنى تحدد الاتجاه الموجب للزاوية (θ) وبالتالي من الشكل نجد:



تدوير جملة إحداثية

$$x_1.x_0 = \cos\theta \qquad y_1.x_0 = -\sin\theta$$
$$x_1.y_0 = \sin\theta \qquad y_1.y_0 = \cos\theta$$

مصفوفة الدوران

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

تمثيل الدوران

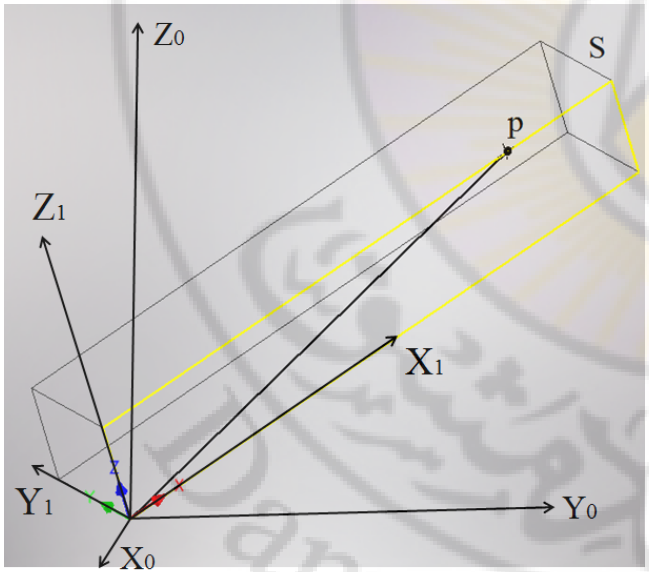
٣) التحويلات الدورانية:

ترتبط جملة المحاور الإحداثية $(0_1\ X_1\ Y_1\ Z_1)$ بالجسم الصلب (S).

الإحداثيات الديكارتية (P^1) للنقطة (P) بالنسبة ($0_1\ X_1\ Y_1\ Z_1$) تطابق المعادلة: $\vec{P} = U\vec{X}_1 + V\vec{Y}_1 + W\vec{Z}_1$

وبتحديد الإحداثيات الديكارتية لـ (P^0) بالنسبة لجملة مرجعية ثابتة $(0_0\ X_0\ Y_0\ Z_0)$ نجد $P^0 = \begin{bmatrix} p.x_0 \\ p.y_0 \\ p.z_0 \end{bmatrix}$

بجمع المعادلتين نحصل على:



إحداثيات نقطة منسوبة إلى جملتين إحداثيتين

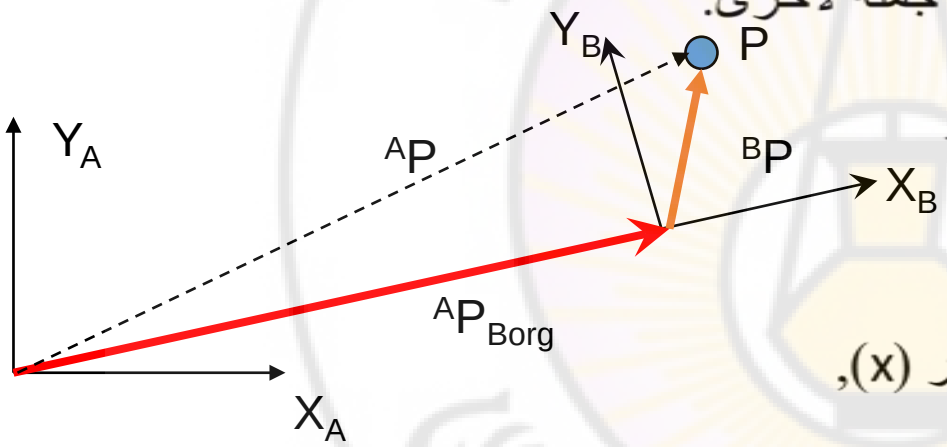
$$P^0 = \begin{bmatrix} (ux_1 + vy_1 + wz_1).x_0 \\ (ux_1 + vy_1 + wz_1).y_0 \\ (ux_1 + vy_1 + wz_1).z_0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} ux_1.x_0 + vy_1.x_0 + wz_1.x_0 \\ ux_1.y_0 + vy_1.y_0 + wz_1.y_0 \\ ux_1.z_0 + vy_1.z_0 + wz_1.z_0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} x_1.x_0 & y_1.x_0 & z_1.x_0 \\ x_1.y_0 & y_1.y_0 & z_1.y_0 \\ x_1.z_0 & y_1.z_0 & z_1.z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = R_1^0.P^1$$

تمثيل الدوران

لكن المصفوفة الناتجة في المعادلة النهائية هي مصفوفة الدوران $(P^0 = R_1^0.P^1)$ وبالتالي فإن مصفوفة الدوران لا تستخدم فقط لتمثيل توجيه الجملة الإحداثية $\{1\}$ بالنسبة للجملة $\{0\}$ بل ايضاً لتحويل الإحداثيات الديكارتية للنقطة من جملة لأخرى.



مثال: يبين الشكل جملة محاور $\{B\}$ التي تدور بالنسبة للحملة $\{A\}$ حول المحور (z) بزاوية (30) درجة، وتنتقل (10) على المحور (x), و (5) وحدات على المحور (y). اوجد $({}^{A}P)$ عندما تكون ${}^{B}P = [3.0, 7.0, 0.0]^T$

$${}^{A}P = {}^{A}T_B \, {}^{B}P = \begin{bmatrix} 9.098 \\ 12.562 \\ 0.000 \end{bmatrix} \qquad {}^{B}P = \begin{bmatrix} 3.0 \\ 7.0 \\ 0.0 \end{bmatrix} \qquad {}^{A}T_B = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.5 & 0.000 & 10.0 \\ 0.5 & 0.866 & 0.000 & 5.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.000 & 0.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

تمثيل الانسحاب والدوران

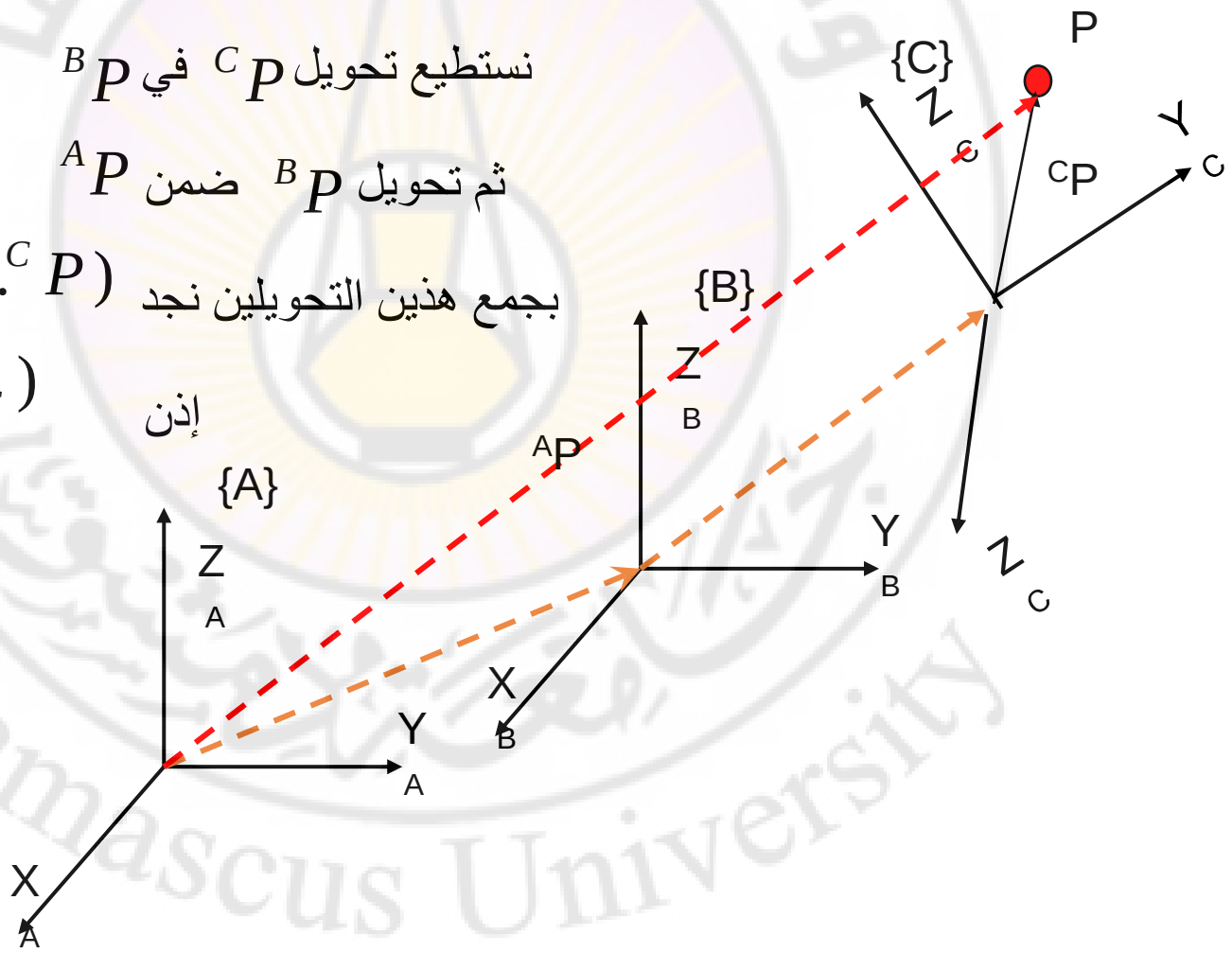
لدينا في الشكل ${}^{C}P$ ونريد معرفة ${}^{A}P$. جملة المحاور $\{C\}$ معلومة بالنسبة للجملة $\{B\}$، وجملة المحاور $\{B\}$ معروفة بالنسبة لجملة المحاور $\{A\}$.

نستطيع تحويل ${}^{C}P$ في ${}^{B}P$ $\quad ({}^{B}P = {}^{B}T_{C} . {}^{C}P)$

ثم تحويل ${}^{B}P$ ضمن ${}^{A}P$ $\quad ({}^{A}P = {}^{A}T_{B} . {}^{B}P)$

بجمع هذين التحويلين نجد $\quad ({}^{A}P = {}^{A}T_{B} . {}^{B}T_{C} . {}^{C}P)$

إذن $\quad ({}^{A}T_{C} = {}^{A}T_{B} . {}^{B}T_{C})$



تمثيل الانسحاب والدوران

$$ {}^{A}T_{C} = \left[\begin{array}{ccc|c} & {}^{A}R_{B}\,{}^{B}R_{C} & & {}^{A}R_{B}\,{}^{B}P_{Corg} + {}^{A}P_{Borg} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] $$

معكوس الانتقال:

مصفوفة الدوران متعامدة، إذن ${}^{B}R_{A} = {}^{A}R_{B}^{-1} = {}^{A}R_{B}^{T}$

إذا ${}^{A}T_{B}$ التحويل من الجملة $\{A\}$ إلى الجملة $\{B\}$ معكوس التحويل يكتب:

$$ {}^{B}T_{A} = \left[\begin{array}{ccc|c} & {}^{A}R_{B}^{T} & & -{}^{A}R_{B}^{T}\,{}^{A}P_{Borg} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] $$

المحاضرة الثانية
٢٧/١٠/٢٠١٦

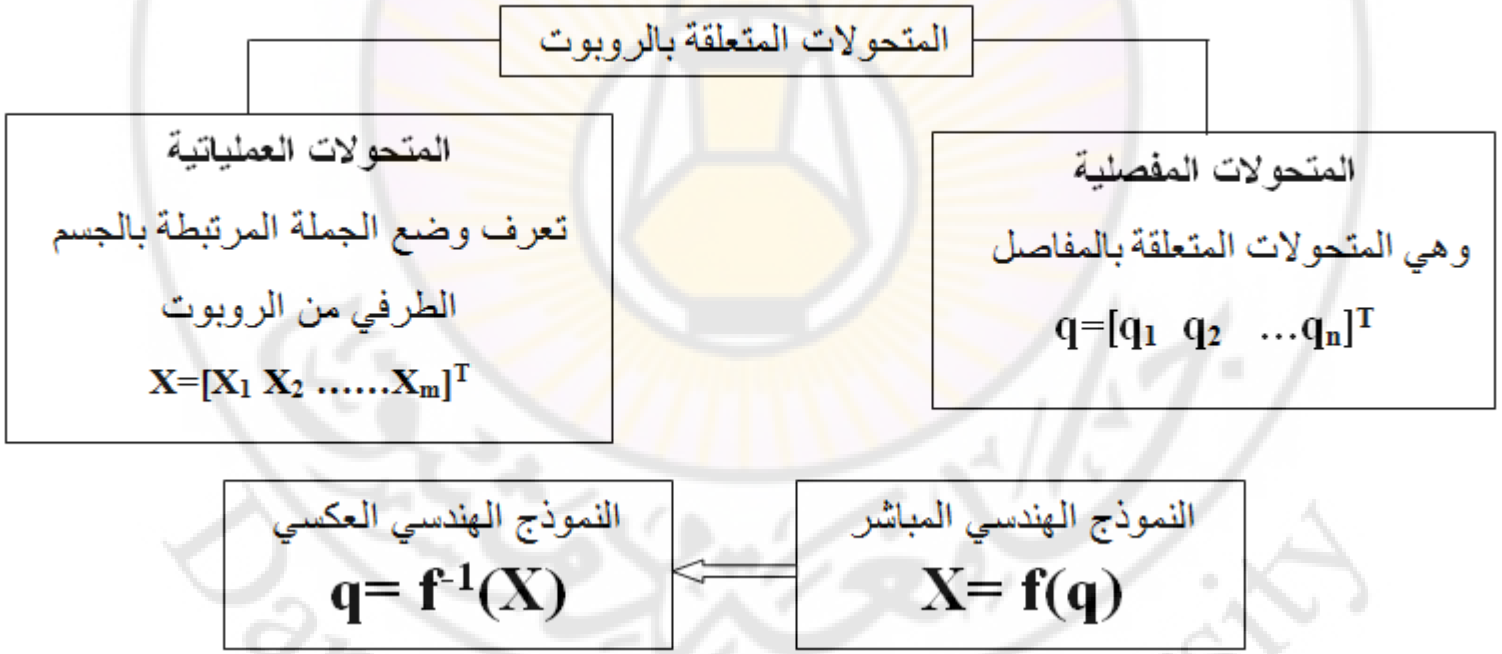
تعاريف اساسية

- النموذج الهندسي المباشر: يمثل العلاقة المباشرة بين الإحداثيات الخارجية وإحداثيات المفاصل.

$$X= f(q)$$

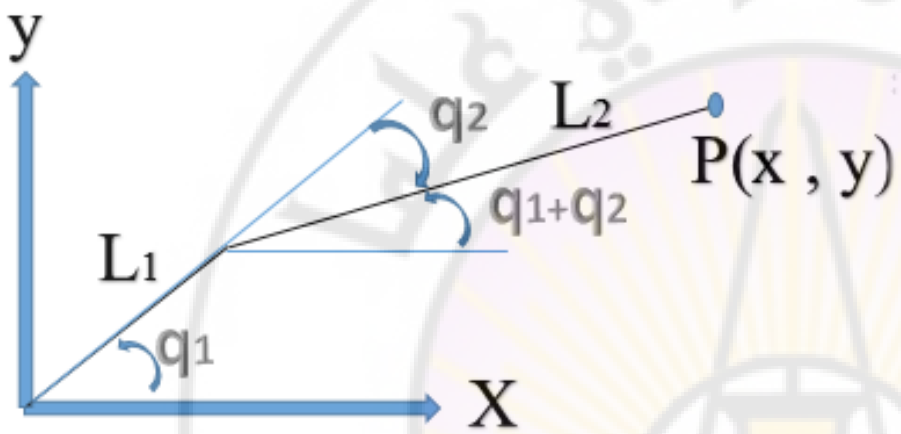
- النموذج الهندسي العكسي: يمثل العلاقة بين إحداثيات المفاصل بالنسبة للإحداثيات الخارجية.

$$q= f^{-1}(X)$$



تعاريف اساسية

- **النموذج الهندسي المباشر:**



$$x = L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2)$$
$$y = L_1 \sin q_1 + L_2 \sin(q_1 + q_2)$$

- **النموذج الهندسي العكسي** هو مجموعة العلاقات التي تعطي قيم المتحولات المفصلية بواسطة المتحولات العملياتية.

$$x^2 + y^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 \cos q_2$$

$$q_2 = \pm \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - (L_1^2 + L_2^2)}{2L_1 L_2}\right)$$

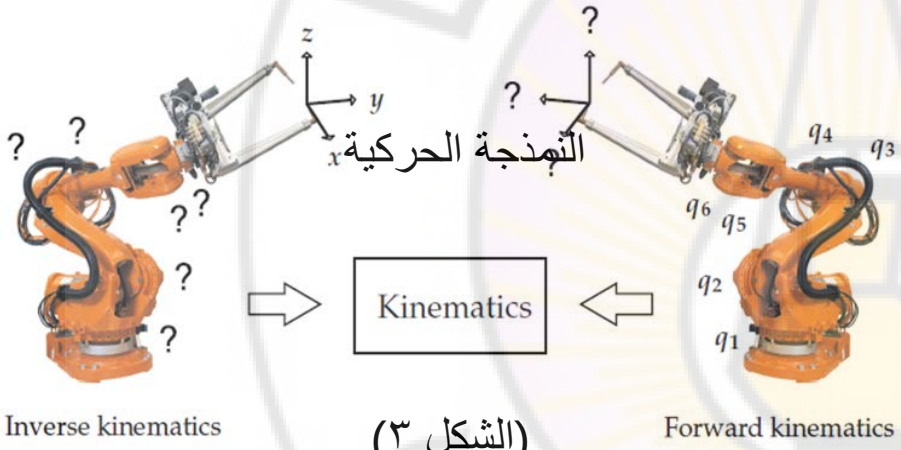
النمذجة الحركية(Kinematics)

إن النموذج الحركي للروبوت يصف حركة الروبوت دون الأخذ بعين الاعتبار المؤثرات الخارجية. وتتضمن النمذجة الحركية تحديد الموقع والسرعة والتسارع وهناك طريقتين للحساب كما هو مبين في (الشكل ٣).

- **النموذج الحركي المباشر**

النمذجة الحركية المباشرة تتمثل بحساب موضع واتجاه الجسم الطرفي للروبوت بدلالة إحداثيات المفاصل (q) وتكتب بالشكل:

$$dx = j(q) * dq$$



(الشكل ٣)

حيث j(q) تمثل المصفوفة اليعقوبية للميكانزم.

المعطيات : (q1, q2, q3, qn) أماكن التوضع لـ n مفصل.

المطلوب : إيجاد مكان توضع النهاية الطرفية واتجاهها.

الحل يكمن في معرفة مصفوفة التحويل وافتراض قيم معينة لزوايا الدوران وكذلك الانتقالات ثم نوجد إحداثيات الجسم الطرفي ونحصل في نهاية الحل على مصفوفة التحويل المباشر

النمذجة الحركية(Kinematics)

مصفوفة التحويل المتجانس $^{i}T_{j} = \left[{}^{i}n_{j} * {}^{i}S_{j} * {}^{i}a_{j} * {}^{i}p_{j} \right]$

$$= \begin{bmatrix} n_x & S_x & a_x & p_x \\ n_y & S_y & a_y & p_y \\ n_z & S_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

فوائد هذا النموذج عديدة منها:

- يشكل قاعدة للنموذج الحركي العكسي.
- إذا حسبنا مشتقات الإحداثيات بالنسبة للزمن $(\dot{x}, \dot{q})$ حصلنا على النموذج الحركي المباشر الذي يعبر عن سرع العمليات بدلالة سرع المفاصل أي: $\dot{X} = j(q) * \dot{q}$
- في السكون يستخدم اليعقوبي (j) للتعبير عن العلاقة التي تربط بين القوى والعزوم المؤثرة على العنصر الطرفي من جهة، والقوى والعزوم الرابطية التي تنتجها المفعلات (محركات، مكابس، ....) من جهة أخرى (عزوم في حال المفاصل الدورانية وقوى في حال المفاصل الانتقالية).

تعاريف اساسية

- **نظام الإحداثيات:** جملة احداثيات نربطها بقاعدة الروبوت. نرمز إلى الجسم (Corp) بـ (Ci) أو (Link) ونرمز بـ (Li) إلى المفصل (Liaison) أو (Joint).
- **درجة الحرية** لسلسلة حركية (DOF) هو عدد البارامترات المستقلة الذي يحدد حالة عنصرها الطرفي في فراغ العمليات (DOF= R max) حيث (R max) يمثل القيمة العظمى للمصفوفة اليعقوبية (مرتبة المصفوفة اليعقوبية (R) تحدد درجة الحرية للسلسلة).
- خواص المصفوفة ((iTj) حيث (i) جملة المحاور الأساسية هي :

$$ {}^{i}T_{j} = \begin{bmatrix} A & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} $$

  - A تمثل الدورانات حول المحاور الأساسية.
  - P تمثل الانتقالات حول المحاور الأساسية.
- يمكن تقسيم مصفوفة التحول إلى الجزأين التاليين :

$$ {}^{i}T_{j} = \begin{pmatrix} A & P \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & P \\ 0 & 1 \end{pmatrix} $$

Damascus University

تعاريف اساسية

- مصفوفة التحول الناتجة عن الانتقال يعبر عنها بالعلاقة (٥-١) كما يلي:

$$ {}^{i}T_{j} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \ldots\ldots (1\text{-}5) $$

$$ {}^{i}T_{j} = Trans(x,a)\,Trans(y,b)\,Trans(z,c) $$

- مصفوفة التحول الناتجة عن الدوران حول المحور (Z) يعبر عنها بالعلاقة (٦-١) كما يلي:

$$ {}^{i}\mathrm{T}_{j} = \mathrm{Rot}(Z,\theta) = \begin{pmatrix} c & -s & 0 & 0 \\ s & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(Z,\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \ldots\ldots (1\text{-}6) $$

- من معادلة الموضع يتم تحديد التحول الانتقالي.
- من معادلات التوجيه يتم تحديد التحول الناتج عن الدورانات حول المحاور الأساسية.

نمذجة الروبوتات (modeling)

هي إيجاد العلاقات التي تربط بين المتحولات المختلفة للروبوت سواء أكانت هذه المتحولات (هندسية أو حركية أو تحريكية) المباشرة والعكسية، وبعدها نقوم بتحديد أبعاد فراغ العمل.

تتم النمذجة على ثلاثة مراحل:

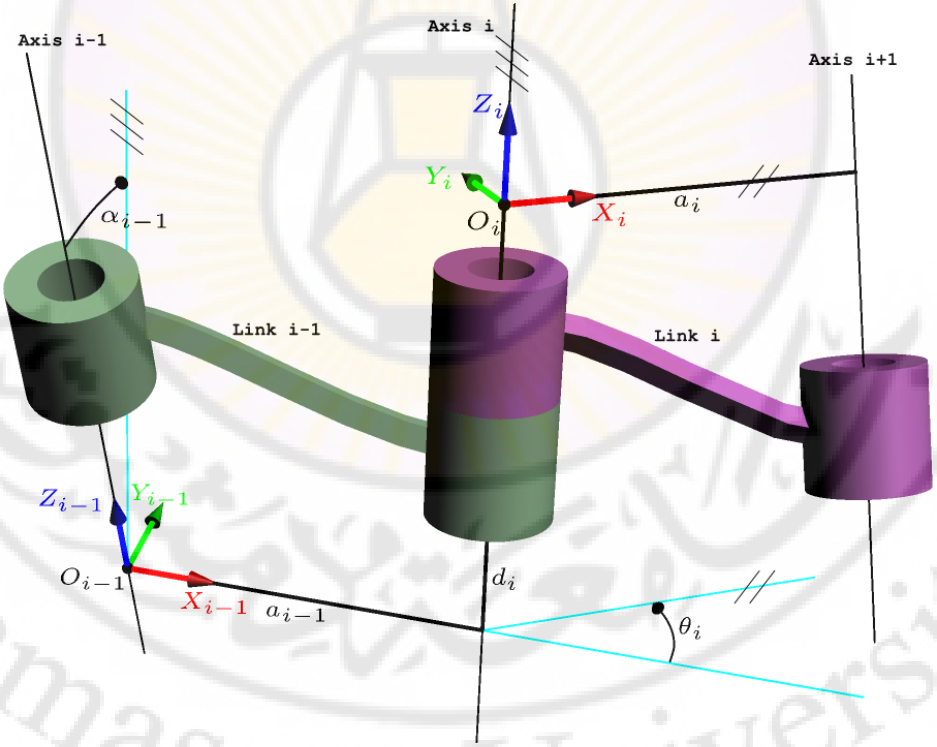
النمذجة الهندسية: نقوم من خلالها بتحديد **فضاء العمل** وذلك من خلال تحديد إحداثيات الجسم الطرفي بدلالة إحداثيات الجملة الصفرية.

النمذجة الحركية: يتم من خلالها إيجاد **السرعات الخطية والتسارعات** لأجزاء الروبوت المختلفة.

النمذجة التحريكية: نقوم من خلالها بحساب **القوى والعزوم** بُغية تحديد المحركات المطلوبة للروبوت، وسيتم إيجاد النموذج التحريكي بواسطة طريقة (نيوتن_أويلر) المستخدمة للحلقات المفتوحة.

بارامترات Denavit-Hartenberg

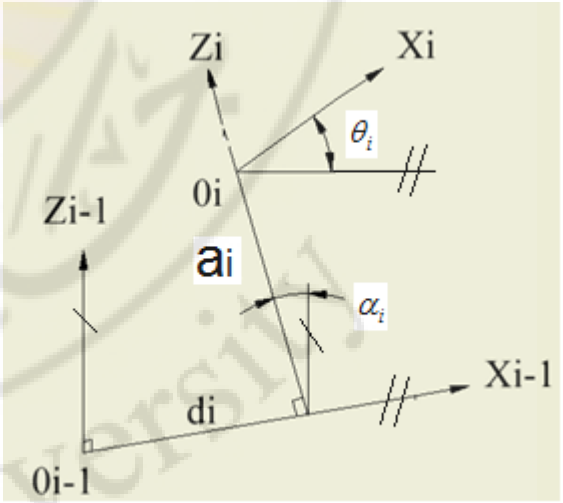
تم وضع عدد كبير من الطرق لهذا الهدف والطريقة الأكثر انتشاراً نظراً لعموميتها وقابليتها للأتمتة هي طريقة (Denavit-Hartenberg) التي تناسب بشكل جيد السلاسل الحركية المفتوحة أو البسيطة وتعتمد على تعريف أربعة بارامترات لكل مفصل حركي بدلاً من ستة، وذلك من خلال مجموعة رموز لتخصيص جمل احداثية إلى زوج من الوصلات المتجاورة.



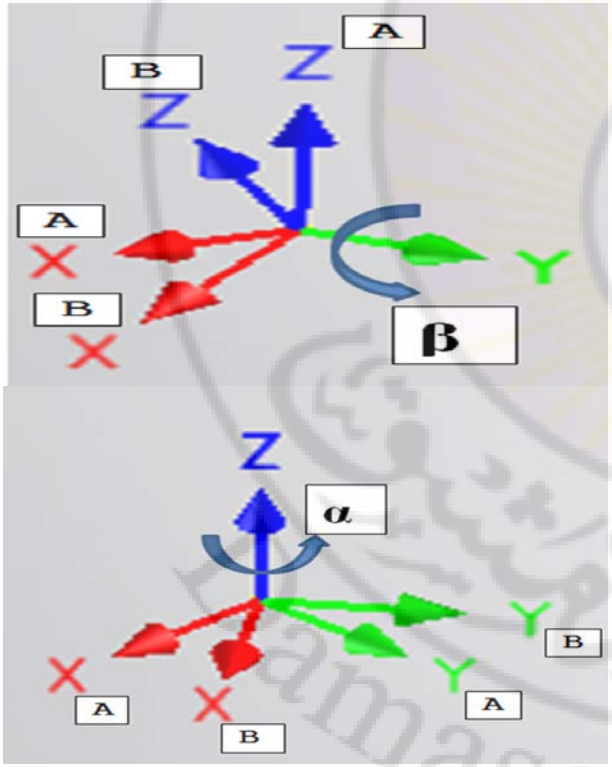
بارامترات Denavit-Hartenberg

- تتضمن هذه الطريقة تحديد أربعة بارامترات لبناء مصفوفة التحويل المتجانسة وهي:
- αi هي الزاوية بين المحورين (Zi-1) و (Zi) الموافقة للدوران حول المحور (Xi-1).
- di هي المسافة بين المحورين (Zi-1) و (Zi)على طول المحور (Xi-1).
- θi هي الزاوية بين المحورين (Xi-1) و (Xi) الموافقة للدوران حول المحور (Zi).
- ai هو المسافة بين المحورين (Xi-1) مع المحور (Xi) على طول المحور (Zi).

		طول الوصلة	المسافة بين الوصلتين	
Link	α	d	a	θ
1				
2				
3				



بارامترات Denavit-Hartenberg



$$Rot(x,\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot(y,\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot(z,\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

بارامترات Denavit-Hartenberg

- مصفوفة التحول النهائية بحسب (Denavit-Hartenberg) من انتقالين ودورانين كما يلي:

$$^{j-1}T_j = Rot(x,\alpha_j)Trans(x,d_j)Rot(Z,\theta_j)Trans(z,r_j)$$

$$^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} Cos\theta_j & -Sin\theta_j & 0 & d_j \\ Cos\alpha_j Sin\theta_j & Cos\alpha_j Cos\theta_j & -\sin\alpha_j & -r_j \sin\alpha_j \\ Sin\alpha_j Sin\theta_j & Sin\alpha_j Cos\theta_j & Cos\alpha_j & r_j \cos\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

نمذجة الروبوتات (modeling)

- **طريقة Denavit-Hartenberg (D.H)**

إن الفكرة الأساسية التي يعتمد عليها مبدأ دينافيت- هارتنبرغ من اجل التحليل الكينماتيكي هي أن نربط جملة محاور مرجعية لكل وصلة من وصلات الروبوت ذي السلسلة المفتوحة، ومن ثم نستنتج التحليل الكينماتيكي الأمامي استناداً إلى معرفة الانزياحات النسبية بين جمل محاور الوصلات المتجاورة. لذلك نفترض أننا قمنا باختيار جملة محاور مرجعية ثابتة، وأن جملة المحاور المرجعية (جملة محاور النهاية العاملة) تم ربطها بنقطة ما من الوصلة الأخيرة في الميكانزم ذي السلسلة المفتوحة. فإذا كانت لدينا السلسلة مكونة من (n) مفصل يمتلك درجة حرية واحدة فانه يتم ترقيم المفاصل تسلسلياً من (٠) إلى (n) بحيث تعتبر الأرض الوصلة رقم (٠) والوصلة الأخيرة التي تم ربط جملة المحاور المرجعية (محاور النهاية العاملة) فيها هي الوصلة رقم (n) وتبعاً لذلك يتم ترقيم جمل المحاور المرجعية المربوطة بالوصلات من (جملة المحاور الثابتة) إلى (جملة محاور النهاية العاملة).

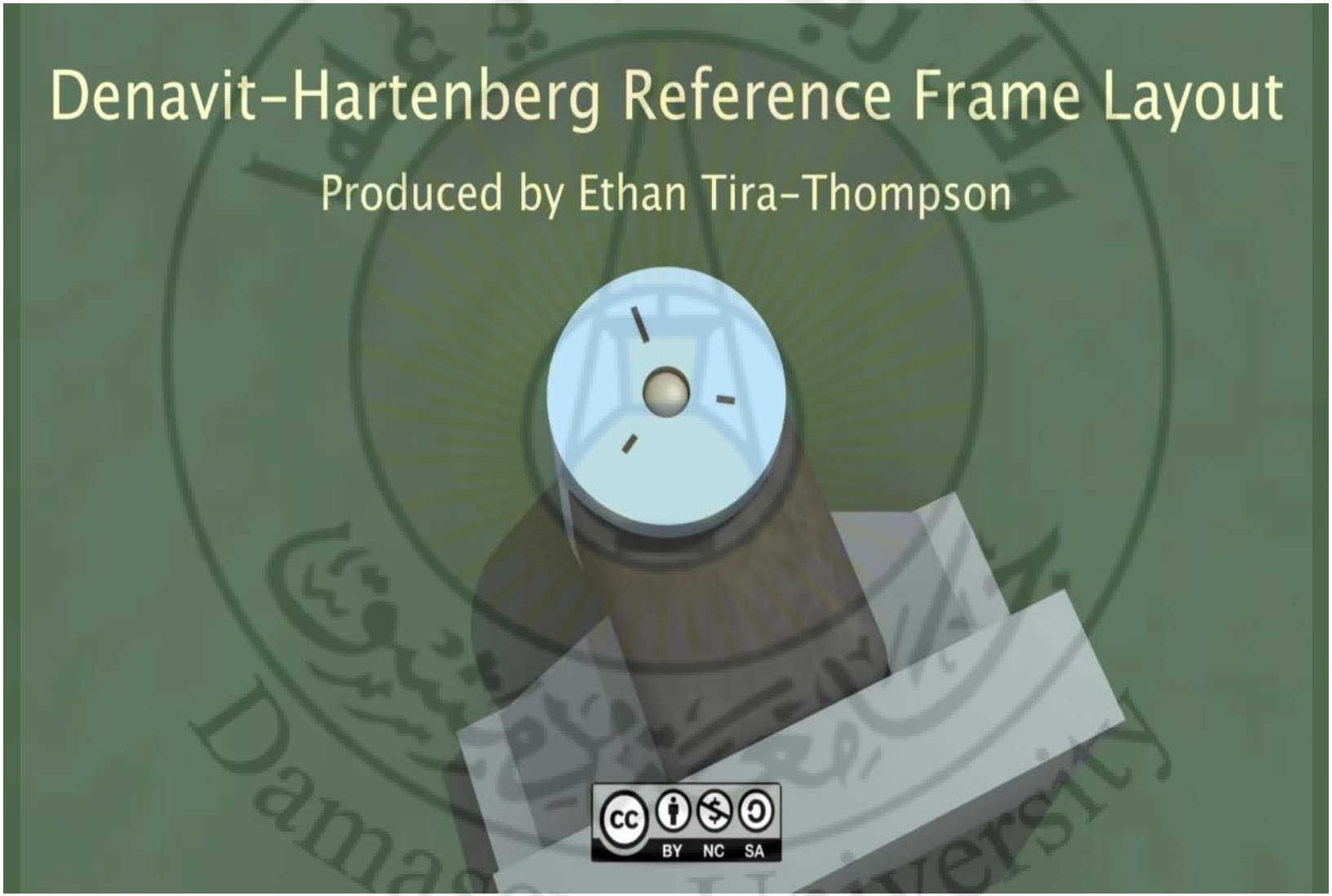
نمذجة الروبوتات (modeling)

- نختار المحور (Zi) بحيث يكون منطبقاً على محور المفصل (i) والمحور (Zi-1) يجب أن يكون منطبقاً على محور المفصل (i-1) ومن ثم فان اتجاه المحور (Z) في كل جملة محاور يتم تحديده وفقاً لقاعدة اليد اليمنى.
- نختار المحور (Xi) بحيث يكون عمودياً على (Zi+1) و (Zi) .
- يتحدد المحور (Y) من خلال الجداء الخارجي (X*Y=Z) ويكون هذا المحور فريد (له احتمال واحد).
- نعرّف أيضاً جملة (RF) مرتبطة بالجسم الطرفي (القبضة).

وبعد تعيين جمل المحاور المرجعية للمفاصل نستطيع أن نعرف أربعة بارامترات التي تحدد مصفوفة التحويل.

بالاعتماد على طريقة (D-H) نختار توضع جمل الإحداثيّات المرتبطة بأجسام الروبوت كما هو مبين في (الشكل ٥).

Denavit-Hartenberg بارامترات

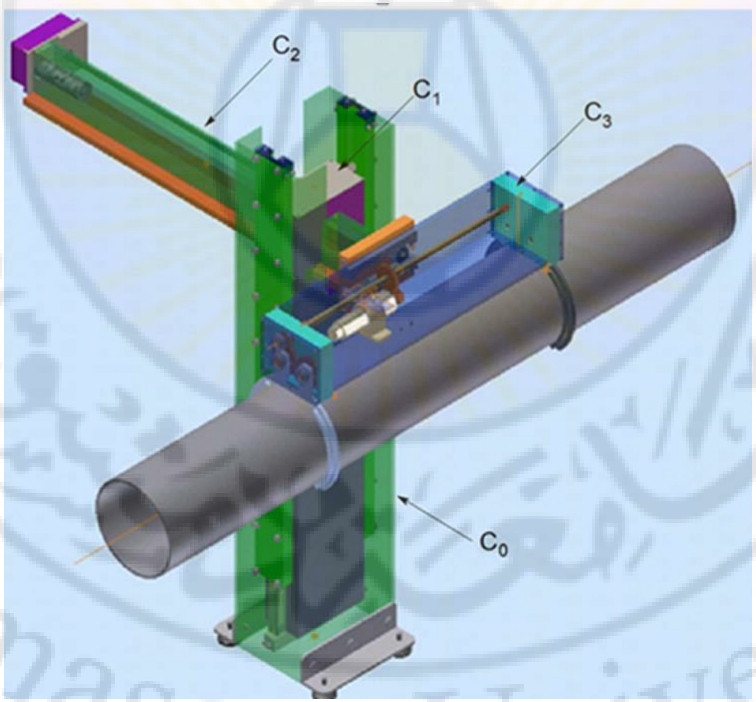


Damascus University

نمذجة الروبوتات (modeling)

- **تطبيق عملي على روبوت بإحداثيات ديكارتية:**

نلاحظ من الشكل أنّ المفصل الإنسحابي الأول (Prismatic joint) بين الجسمين (C0) و (C1) ويسمح للجسم بالتحرك نحو الأعلى والأسفل. أما المفصل الإنسحابي الثاني فهو بين الجسمين (C1) و (C2) ويسمح للجسم بالتحرك نحو الأمام والخلف. المفصل الإنسحابي الأخير يربط الجسمين(C2) و(C3) ويسمح للجسم بالتحرك نحو اليمين واليسار .



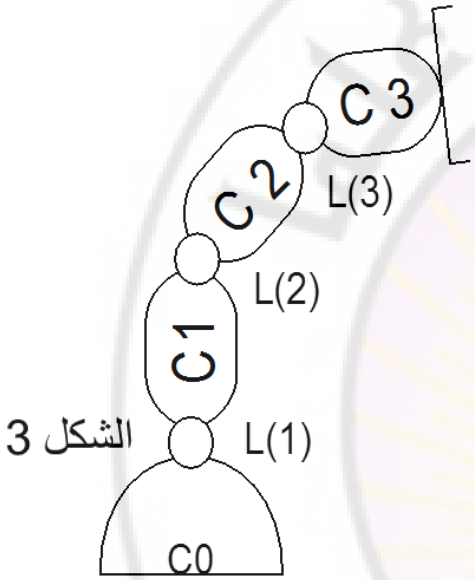
نمذجة الروبوتات (modeling)

مواصفات السلسلة الحركية للروبوت

عدد الأجسام الكلي C =4.

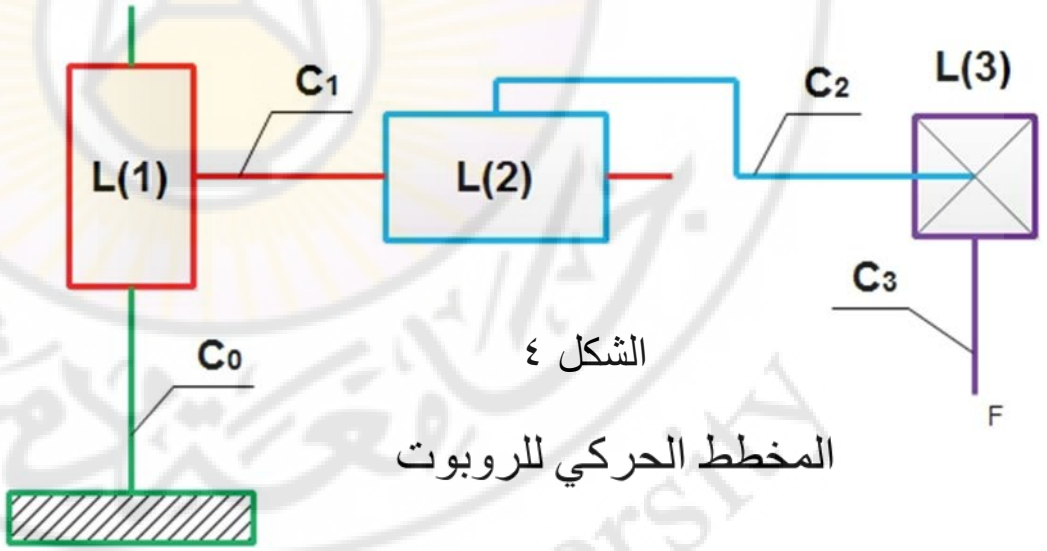
عدد المفاصل الكلي L=3.

درجة الحرية للروبوتات ذات السلسلة المفتوحة تساوي عدد المفاصل.



الشكل 3

السلسلة الحركيّة للروبوت

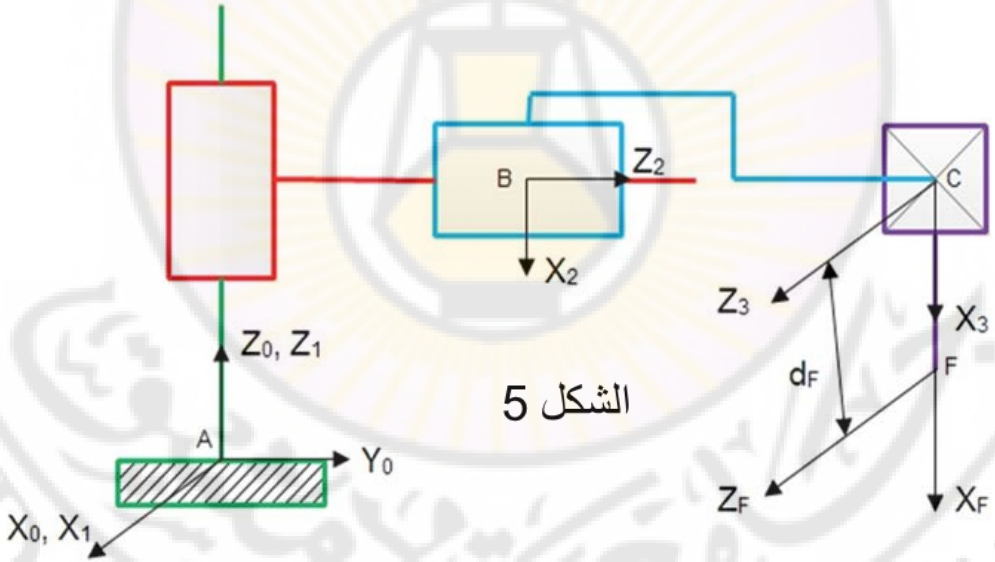


الشكل ٤

المخطط الحركي للروبوت

نمذجة الروبوتات (modeling)

- **النمذجة الهندسيّة**
- إن نمذجة الروبوت تعبر عن مجموعة من الإجراءات والعمليات الحسابية التي تهدف إلى إيجاد موقع (Position) واتجاه (Orientation) جملة المحاور المرتبطة بالجسم الطرفي، وبالتالي يكون الهدف من هذه النمذجة تحديد إحداثيات الجسم الطرفى بدلالة إحداثيات الجملة الصفرية، وتحديد فضاء العمل.



الشكل 5

جمل الإحداثيات المرتبطة بكل جسم من أجسام الروبوت

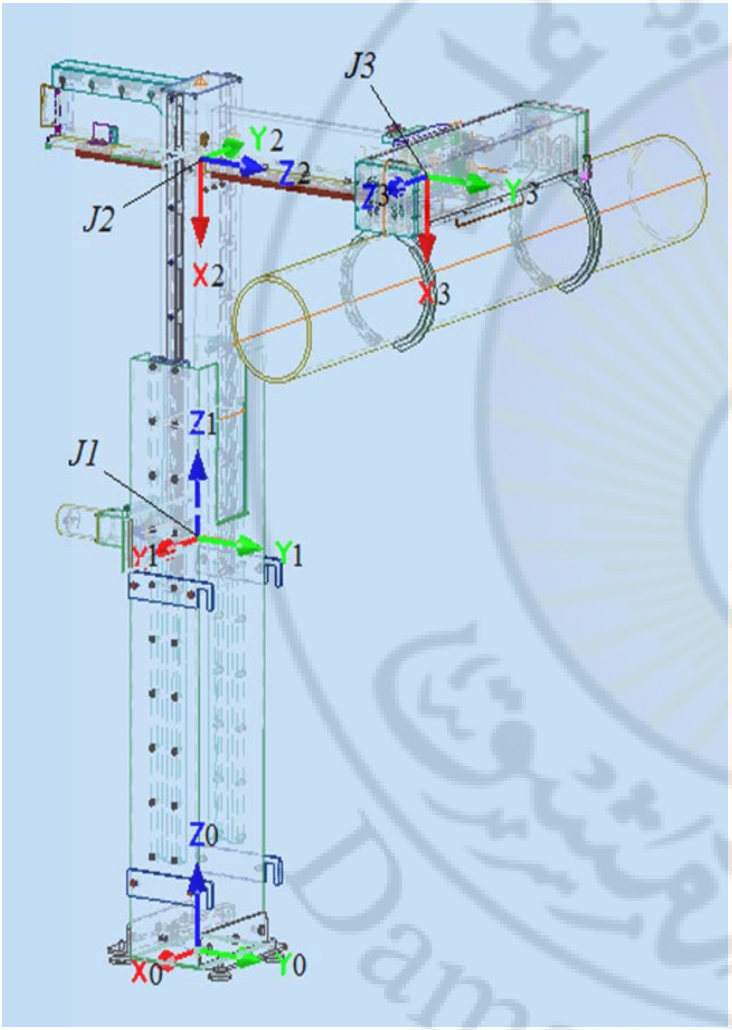
نمذجة الروبوتات

نلاحظ في الشكل أن الأجسام ترتبط فيما بينها بالمفاصل التالية:

- J(1) :مفصل انسحابي بسيط بين الجسمين (C0وC1) وفق المحور (Z1).
- J(2) : مفصل انسحابي بسيط بين الجسمين (C1وC2) وفق المحور (Z2).
- J(3): مفصل انسحابي بسيط بين الجسمين (C2وC3) وفق المحور (Z3).

i	σi	αi	di	θi	ri
1	1	0	0	0	r1
2	1	-90°	0	90°	r2
3	1	90 °	0	0	r3
F	-	0	df	0	0

تم إيجاد المتحولات الهندسية الخاصّة بهذا الروبوت وفق الجدول.



جمل الإحداثيات المرتبطة بكل مفصل من الروبوت

نمذجة الروبوتات (modeling)

حيث يكون لدينا σ_i للدلالة على نوع المفصل:

- ($\sigma_i = 0$) المفصل دوراني.
- ($\sigma_i = 1$) المفصل الإنسحابي.

- α_i :الزاوية بين المحورين (Z_{i-1}) و(Z_i) الموافقة للدوران حول المحور (X_{i-1}).
- d_i: المسافة بين المحورين (Z_{i-1}) و (Z_i)على طول المحور (X_{i-1}) .
- θ_i : الزاوية بين المحورين (X_{i-1}) و (X_i) الموافقة للدوران حول المحور(Z_i) .
- r_i: المسافة بين المحورين (X_{i-1})و (X_i) على طول المحور (Z_i) .

تكتب مصفوفة الانتقال ${}^{i-1}T_i$ من جملة إلى الجملة التي تليها كما يلي:

حيث تمثل الأعمدة الثلاثة الأولى الدورانات حول المحاور، والعمود الرابع يمثل الانتقال. بتعويض البارامترات الموجودة في (الجدول السابق) في علاقة ${}^{i-1}T_i$ يمكننا تعريف مصفوفات الانتقال كما يلي:

$$ {}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & d_i \\ \cos\alpha_i \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i & -r_i \sin\alpha_i \\ \sin\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \cos\theta_i & \cos\alpha_i & r_i \cos\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad .....(3-1) $$

نمذجة الروبوتات

$$ {}^{0}\mathbf{T}_{1}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&r_1\\0&0&0&1\end{bmatrix} \quad {}^{1}\mathbf{T}_{2}=\begin{bmatrix}0&-1&0&0\\0&0&1&r_2\\-1&0&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \quad {}^{2}\mathbf{T}_{3}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&0&-1&r_3\\0&1&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \quad {}^{3}\mathbf{T}_{F}=\begin{bmatrix}1&0&0&d_F\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} $$

وبالتالي يكون حاصل جداء المصفوفات:

$$ {}^{0}\mathbf{T}_{F}={}^{0}\mathbf{T}_{1}\,{}^{1}\mathbf{T}_{2}\,{}^{2}\mathbf{T}_{3}\,{}^{3}\mathbf{T}_{F}=\begin{bmatrix}0&0&1&r_3\\0&1&0&r_2\\-1&0&0&r_1-d_F\\0&0&0&1\end{bmatrix} \qquad (3-2) $$

النموذج الهندسي المباشر والعكسيّ

يعطي النموذج الهندسيّ المباشر إحداثيّات الجسم الطرفيّ(F) بدلالة الإحداثيّات المفصليّة المزوّدة بمحركات (q)، وفق العلاقة X=F(q) حيث أنّ الإحداثيّات المفصليّة التي زوّدناها بمحركات هي: $\mathbf{q}=(r_1\ \ r_2\ \ r_3)^T$ والإحداثيات المرغوب التحكم بها للجسم الطرفي هي: $\mathbf{X}=(x_F\ \ y_F\ \ z_F)^T$

نمذجة الروبوتات

- يمثل x_F, y_F, z_F إحداثيّات النهاية الفعالة والممثلة بالنقطة F في الجملة R0.
- من المصفوفة (٢-٣) يمكن استنتاج النموذج الهندسيّ المباشر الذي يعطى بالعلاقات التالية:

$$x_F = r_3 \qquad (3-3)$$

$$y_F = r_2 \qquad (3-4)$$

$$z_F = r_1 - d_F \qquad (3-5)$$

- ويكون النموذج الهندسيّ العكسيّ (Inverse geometric model) ذو العلاقة $\mathbf{q} = F^{-1}(\mathbf{X})$ هو:

$$r_3 = x_F \qquad (3-6)$$

$$r_2 = y_F \qquad (3-7)$$

$$r_1 = z_F + d_F \qquad (3-8)$$

نمذجة الروبوتات

- **فضاء العمل**

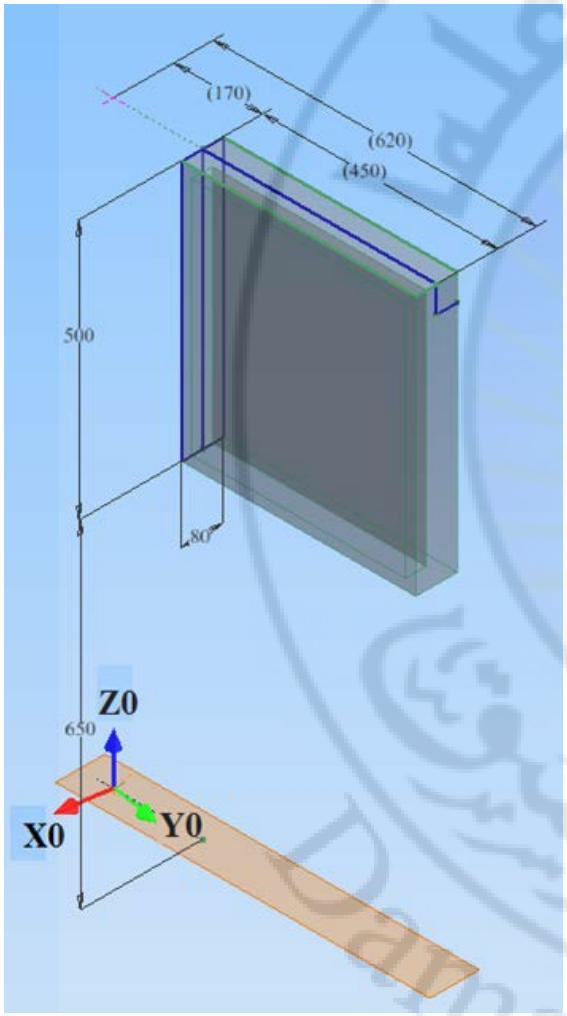
نقصد بفضاء العمل جميع النقاط التي تستطيع النهاية الطرفية (F) الوصول إليها في الفضاء.
يتغيّر موضع النقطة F بتغيّر الإحداثيات المفصلية $\mathbf{q} = [r_1 \; r_2 \; r_3]^T$.

لتحديد ما هو فضاء العمل المطلوب لتأدية وظيفة الروبوت، نقوم بتحديد شوط الإحداثيات المفصلية بالنسبة للجملة (X0,Y0,Z0)، بحيث نأخذ بعين الاعتبار المعطيات الأساسية التالية:

- القيمة الدنيا لارتفاع الروبوت (r_1 min) تتحدد تبعاً لارتفاع المشغولة الأصغري وفق Z0.
- القيمة العليا لارتفاع الروبوت (r_1 max) تتحدد تبعاً لارتفاع المشغولة الأعظمي وفق Z0 .
- (r_2 min) تتحدد تبعاً للمسافة التي تفصل المشغولة عن مركز إحداثيات الروبوت وفق المحور Y0.
- (r_2 max) تتحدد تبعاً للمسافة التي تفصل المشغولة عن مركز إحداثيات الروبوت وفق المحور Y0.
- البعد الثالث (r3) يتحدد من دخول المشغولة بالآلة وفق المحور X0.

نمذجة الروبوتات

- فضاء العمل (80 X 500 X 450 mm).



- النمذجة الحركيّة :

يُعطي النموذج الحركيّ المباشر مركّبات سرعة $\dot{\mathbf{X}} = [\dot{x}_F \ \dot{y}_F \ \dot{z}_F]^T$ الجسم الطرفي بدلالة سرع $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{r}_1 \ \dot{r}_2 \ \dot{r}_3]^T$ الإحداثيّات المفصليّة المزوّدة بمحركات ،

وذلك بالاستعانة بالمصفوفة اليعقوبيّة **J(q)** وفق العلاقة:

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

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i(q)}{\partial q_j}$$

نمذجة الروبوتات

- **النموذج الحركيّ المباشر والعكسيّ:**

باشتقاق النموذج الهندسي المباشر نحصل على النموذج الحركي المباشر الذي يعطى بالعلاقات التالية:

$$\dot{x}_F = \dot{r}_3 \qquad (3-9)$$
$$\dot{y}_F = \dot{r}_2 \qquad (3-10)$$
$$\dot{z}_F = \dot{r}_1 \qquad (3-11)$$

والنموذج الحركي العكسي بالعلاقات التالية:

$$\dot{r}_3 = \dot{x}_F \qquad (3-12)$$
$$\dot{r}_2 = \dot{y}_F \qquad (3-13)$$
$$\dot{r}_1 = \dot{z}_F \qquad (3-14)$$

المصفوفة اليعقوبيّة : انطلاقاً من المعادلات (١٢) و(١٣) و(١٤) التي تمثّل النموذج الحركيّ المباشر نستنتج المصفوفة اليعقوبيّة:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (3-15)$$

Damascus University

نمذجة الروبوتات

النمذجة التحريكية:

من خلال النمذجة التحريكية يتم حساب القوى والعزوم المؤثرة على المفاصل، وبالتالي يتم حساب واختيار المحركات الكهربائية.

$$\Gamma = f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{F}_e) \qquad (3-16)$$

حيث :

- Γ: شعاع (العزم/القوة) للمحرك سواء كان المفصل دورانياً أو انسحابياً.
- $\mathbf{q}$: شعاع الموضع للمفصل.
- $\dot{\mathbf{q}}$: شعاع السرعة للمفصل.
- $\ddot{\mathbf{q}}$: شعاع التسارع للمفصل.
- $\mathbf{F_e}$: شعاع القوى والعزوم الخارجية المطبقة من قبل الجسم الطرفي على المحيط.

نسمي العلاقة (٣-١٦) بالنموذج التحريكي العكسي، وفيه نحسب القوى والعزوم التي يطلب من المحركات تأمينها بعد معرفة قيم المواضع والسرع والتسارعات للمفاصل. في حين أن العلاقة (٣-١٧) والتي تدعى بالنموذج التحريكي المباشر، نحسب من خلالها التسارعات المفصلية بدلالة الموضع والسرعة وشعاع (العزم/السرعة) للمحركات.

$$\ddot{\mathbf{q}} = g(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \Gamma, \mathbf{F}_e) \qquad (3-17)$$

نمذجة الروبوتات

يفيدنا النموذج التحريكي المباشر في عملية نمذجة الروبوت في حين أننا نستخدم النموذج التحريكي العكسي في عملية التحكم واختيار المحركات المناسبة. لإيجاد النموذجين المباشر والعكسي نلجأ إلى عدة طرق منها:

- طريقة لاغرانج (Lagrange) تستخدم للحلقات المغلقة.
- طريقة نيوتن_أويلر (Newton Euler) وتستخدم للحلقات المفتوحة.

في حالتنا الروبوت عبارة عن حلقة مفتوحة لذلك سنستخدم طريقة Newton Euler.

- **إيجاد النموذج التحريكي بواسطة طريقة (نيوتن_أويلر):**

لحساب النموذج التحريكي سنعتمد طريقة المعادلات التكرارية فلحساب النموذجين المباشر والعكسي نحتاج لتكراريتين تقدمية وتراجعية.

في **التكرارية التقدمية** (The Forward Recurrence) نبدأ من قاعدة الروبوت، أي من الجسم (C0) وصولاً للجسم الطرفي، نقوم في كل مرحلة بحساب السرعة والتسارع للأجسام تباعاً، من ثمّ نحسب القوة والعزم الكليين المؤثرين على كل جسم بناءً على المعادلتين (١٨) و (١٩).

في **التكرارية التراجعية** (The Backward Recurrence) نبدأ من الجسم الطرفي وصولاً للجسم (C0)، نحسب في كل مرحلة العزوم والقوى للمحركات بعد تحديد القوى والعزوم التي تؤثر بها الأجسام على بعضها البعض.

نمذجة الروبوتات

التكرارية التقدمية

معادلة نيوتن_أويلر تعبر عن العزم أو القوة الخارجيين المؤثرين على مركز ثقل الجسم .

علاقة نيوتن_أويلر لحساب القوة الخارجية هي : (3-18) $\mathbf{F_i} = M_i \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{G_i}}$

- Fi: محصلة القوى الخارجية المؤثرة على الجسم (Ci).
- Mi:كتلة الجسم (Ci) .
- V_{Gi}: شعاع التسارع الخطي لمركز ثقل الجسم (Ci).

علاقة نيوتن_أويلر لحساب العزم الخارجي هي : (3-19) $\mathbf{T_{G_i}} = \mathbf{I_{G_i}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathbf{i}} + \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{i}} \cdot \left[\mathbf{I_{G_i}}\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{i}}\right]$

- T_{Gi}: العزم الكلي المؤثر على الجسم .
- I_{Gi}: مصفوفة العطالة للجسم .
- ω_i: السرعة الزاوية للجسم .
- $\dot{\omega}_i$: التسارع الزاوي للجسم .
- **ملاحظة** : بما أنّ جميع المفاصل في الروبوت الديكارتي هي مفاصل انسحابية فستكون كل المقادير التي تخص المفاصل الدورانية معدومة، لذلك سنكتفي عند كتابة المعادلات بالمقادير الإنسحابيه، وسنكتفي بحساب القوى دون التطرق لحساب العزوم.

نمذجة الروبوتات

- باعتبار القوة (Fi) تؤثر على (Oi) مركز الجملة (Ri) تصبح المعادلة (٣-١٨) كما يلي:

$$\mathbf{F_i} = M_i \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{i}} \qquad (3-20)$$

- $\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{i}}$: تسارع مركز الجملة (Ri)و يحسب المقدار ($\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{i}}$) من العلاقة (٣-٢١):

$$\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{i}} = \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{i-1}} + \ddot{q}_i \mathbf{a_i} \qquad (3-21)$$

- حيث (ai) شعاع الواحدة على طول المحور (Zi) بالنسبة للجملة (R0) ، بفرض شعاع تسارع الجسم (Ci) هو $\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{0}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$ يكون لدينا:

$$\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{1}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{r}_1 + g \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{2}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{r}_2 \\ \ddot{r}_1 + g \end{bmatrix} \qquad (3-22)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{F}} = \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{3}} = \begin{bmatrix} \ddot{r}_3 \\ \ddot{r}_2 \\ \ddot{r}_1 + g \end{bmatrix}$$

بمعرفة قيم التسارعات الخطية نستطيع حساب المقدار (Fi) من العلاقة (٣-٢٠) فيكون لدينا :

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_1(\ddot{r}_1 + g) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ M_2 \ddot{r}_2 \\ M_2(\ddot{r}_1 + g) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_3 = \begin{bmatrix} M_3 \ddot{r}_3 \\ M_3 \ddot{r}_2 \\ M_3(\ddot{r}_1 + g) \end{bmatrix} \qquad (3-23)$$

نمذجة الروبوتات

- **التكرارية التراجعية :** يبيّن (الشكل -) القوى المؤثرة على الجسم (Ci).
- fi: القوة المطبقة من قبل الجسم (Ci) على الجسم (Ci-1).
- Fei: القوة التي يطبقها الجسم على المحيط.

بحساب المقدار (fi) وإضافة تأثير الاحتكاك تُحسب القوة المراد من المحرك التغلب عليها، على اعتبار المحرك مثبت على الجسم (Ci-1) ويريد تحريك الجسم (Ci) ، أما علاقة حساب (fi) فتستنتج من (الشكل -) وهي عبارة عن علاقة تكرارية:

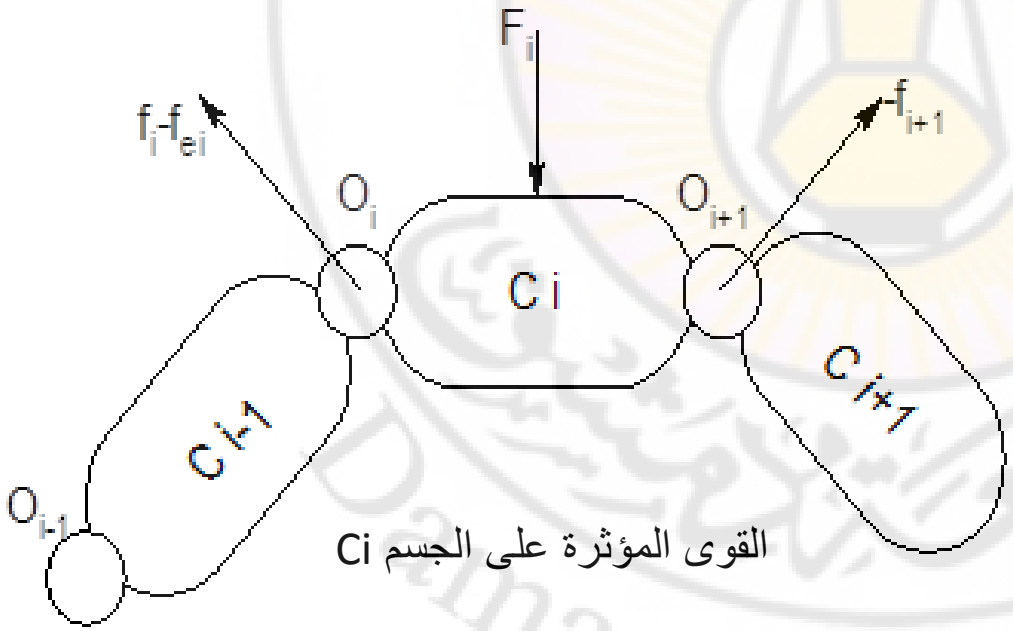
$$\mathbf{f_i} = \mathbf{F_i} + \mathbf{f_{i+1}} + \mathbf{f_{ei}} \qquad (3-24)$$

نبدأ بالحساب من الجسم الطرفي المرتبط بالجسم (C3) وصولاً إلى الجسم (C1) مع أخذ الاعتبارات التالية بالحسبان:

- نعتبر المقدار (fei) معدوم دوماً.
- نعتبر أنَّ

$$\mathbf{f_{i+1}} = \mathbf{f_L} + M_L \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$$

حيث:



القوى المؤثرة على الجسم Ci

(M_L) كتلة الحمل، (f_L) القوة المطبقة على الجسم الطرفي للروبوت. وبالتالي يكون لدينا:

نمذجة الروبوتات

$$\begin{cases} \mathbf{f}_3 = \mathbf{F}_3 + \mathbf{f}_L = \begin{bmatrix} (M_3)\ddot{r}_3 \\ (M_3)\ddot{r}_2 \\ (M_3)(\ddot{r}_1 - g) - M_L g \end{bmatrix} \\ \mathbf{f}_2 = \mathbf{F}_2 + \mathbf{f}_3 = \begin{bmatrix} (M_3)\ddot{r}_3 \\ (M_2 + M_3)\ddot{r}_2 \\ (M_2 + M_3)(\ddot{r}_1 - g) - M_L g \end{bmatrix} \\ \mathbf{f}_1 = \mathbf{F}_1 + \mathbf{f}_2 = \begin{bmatrix} (M_3)\ddot{r}_3 \\ (M_2 + M_3)\ddot{r}_2 \\ (M_1 + M_2 + M_3)(\ddot{r}_1 - g) - M_L g \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3-25)$$

- **حساب عزوم المحركات:**

بعد حساب المقدار (fi) وإضافة تأثير الاحتكاك نحصل على شدة القوة (Γi) المراد من المحرك أن يتغلب عليها وتحسب هذه القوة من العلاقة (٢٦-٣) □26□3□ □ $\mathbf{f_i a_i}$ □ F_{f_i} □ □

Fi: شدة قوة الاحتكاك في المفصل (i) وبالتالي:

نمذجة الروبوتات

$$\begin{cases} G_1 = \mathbf{f_1}\,\mathbf{a_1} + F_{f_1} = (M_1 + M_2 + M_3)(\ddot{r}_1 - g) - M_L g + F_{f_1} \\ G_2 = \mathbf{f_2}\,\mathbf{a_2} + F_{f_2} = (M_2 + M_3)(\ddot{r}_2) - (M_2 + M_3 + M_L) g m_2 \\ G_3 = \mathbf{f_3}\,\mathbf{a_3} + F_{f_3} = (M_3)(\ddot{r}_3) - (M_3 + M_L) g m_3 \end{cases} \quad (3-27)$$

- بإهمال قيم التسارعات المفصلية لصغرها تصبح العلاقة (27-2) على الشكل التالي:

$$\begin{cases} G_1 = f_1 + F_{f_1} = -(M_1 + M_2 + M_3 + M_L)(g) + F_{f_1} \\ G_2 = f_2 + F_{f_2} = -(M_2 + M_3 + M_L)(g m_2) \\ G_3 = f_3 + F_{f_3} = -(M_3 + M_L)(g m_3) \end{cases} \quad (3-28)$$

- بعد الانتهاء من تصميم الروبوت يتم معرفة أوزان الكتل وهي كالتالي:

$$M_1 = \quad kgf, \quad M_2 = \quad kgf, \quad M_3 = \quad kgf, \quad M_L = \quad kgf.$$

- مجموع الأوزان المؤثرة على الجزء الثابت من المفصل (J1) هي:
- $M=M1+M2+M3+M_L=\ldots.$ Kgf. بالتعويض في العلاقة (3-28) بعد معرفة معامل الاحتكاك للمفاصل الذي له علاقة بمادة المفصل نجد القوى المؤثرة على المفاصل.

نمذجة الروبوتات

- بما أنّ المحرك يحرك كل جسم من الأجسام عن طريق جريدة مسننة فنحسب عزم المحرك اللازم بضرب القوة المحسوبة من خلال العلاقة (٢-٢٧) بنصف قطر المسنن (R= .. m.) المرتبط بكل محرك من المحركات الثلاثة كما تبين العلاقة (٢-٢٨).

$$\begin{cases} T_{m1} = G_1 R_1 \\ T_{m2} = G_2 R_2 \\ T_{m3} = G_3 R_3 \end{cases} \qquad (3\text{-}29)$$

- Tmi: عزم المحرك i.
- Ri: نصف قطر المسنن المرتبط بالمحرك i.
- بالحساب وفق العلاقة (3-29) يتم حساب عزوم المحركات النظرية ، وبترك معامل الأمان المناسب (h_1) يتم اختيار المحركات.
- حساب الزمن اللازم لدورة عمل واحدة

تم اختيار عدد دورات المحرك الأول (n1=20 rpm) ومن هنا يمكن حساب السرعة الزاوية لمسنن الخرج ($\omega_1 = (\pi . n_1)/30 = 2\,rad/s$) وبتحويل هذه السرعة إلى الجريدة المسننة ذات السرعة $V_1 = w_1 * R = 2*0.013 = 0.027\ m/s$ وباعتبار أن طول الشوط الأول (L1=0.5 m) يكون الزمن اللازم للشوط الأول $S_1 = L_1 / V_1 = 0.5 / 0.027 = 18s$.

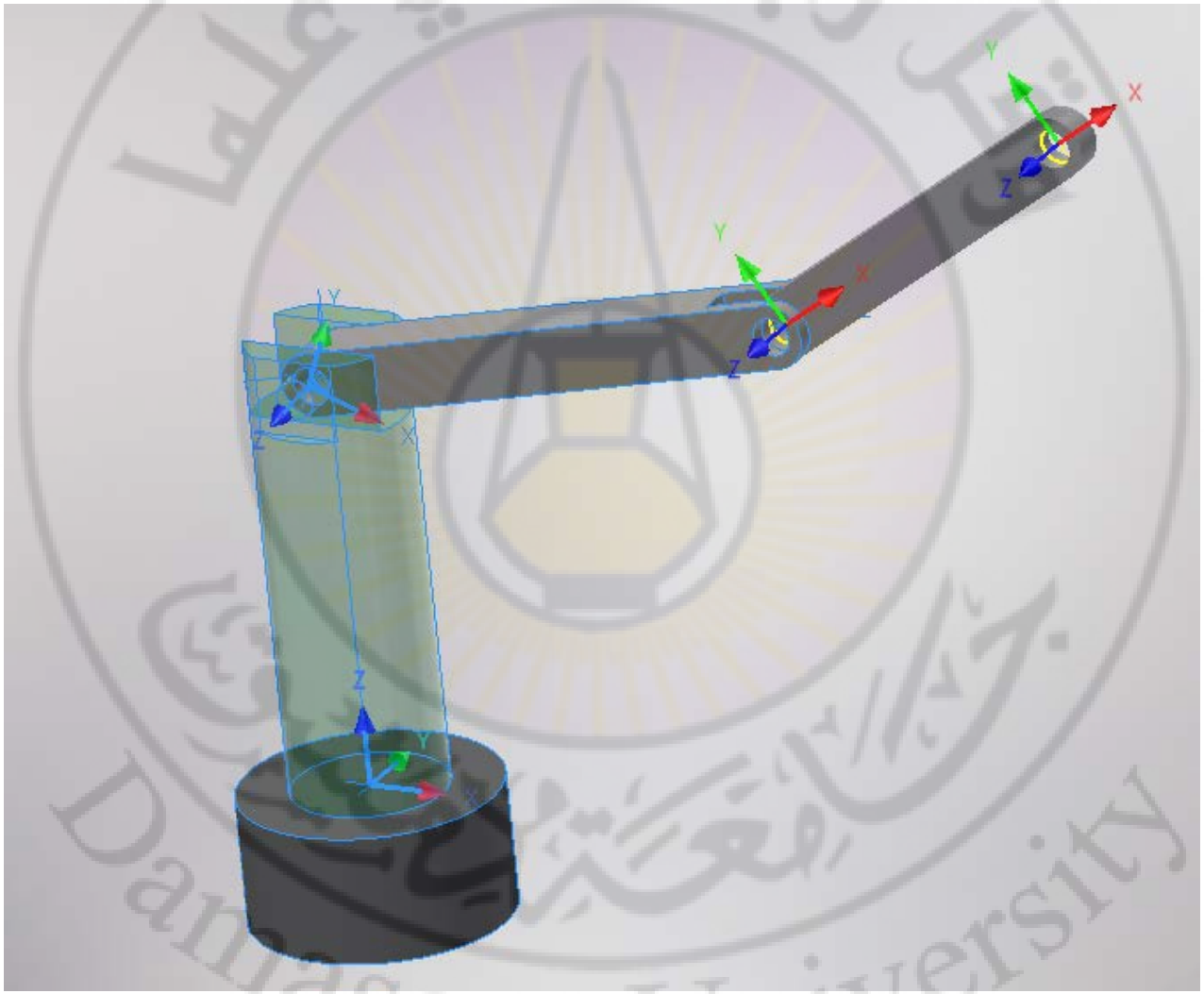
بنفس الطريقة يتم حساب الزمن اللازم للشوطين الثاني والثالث ، وبالتالي الزمن لدورة عمل واحدة.

نمذجة الروبوتات

- النتائج:

رقم المفصل	القوة الواجب التغلب عليها	نصف قطر المسنن	العزم المطلوب	شوط الجريدة	زمن الحركة	السرعة الخطية للجريدة
المفصل الأول						
المفصل الثاني						
المفصل الثالث						

الدراسة الحركية لذراع روبوت RRR



Damascus University

الدراسة الحركية لذراع روبوت

لدينا مناول بسيط يتألف من ثلاث وصلات (L1,L2,L3)، وثلاثة مفاصل دورانية (سوف نحل هذه المسألة على مرحلتين:

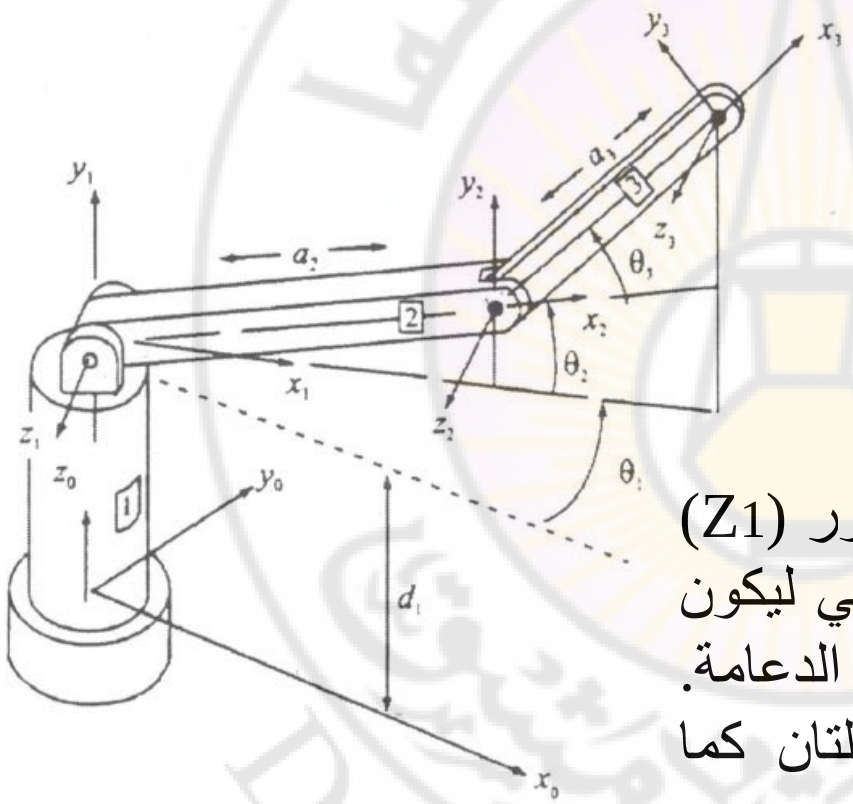
١) توضع النهاية الطرفية .

٢) توجيهه واستخدامه.

- الخطوة الأولى:

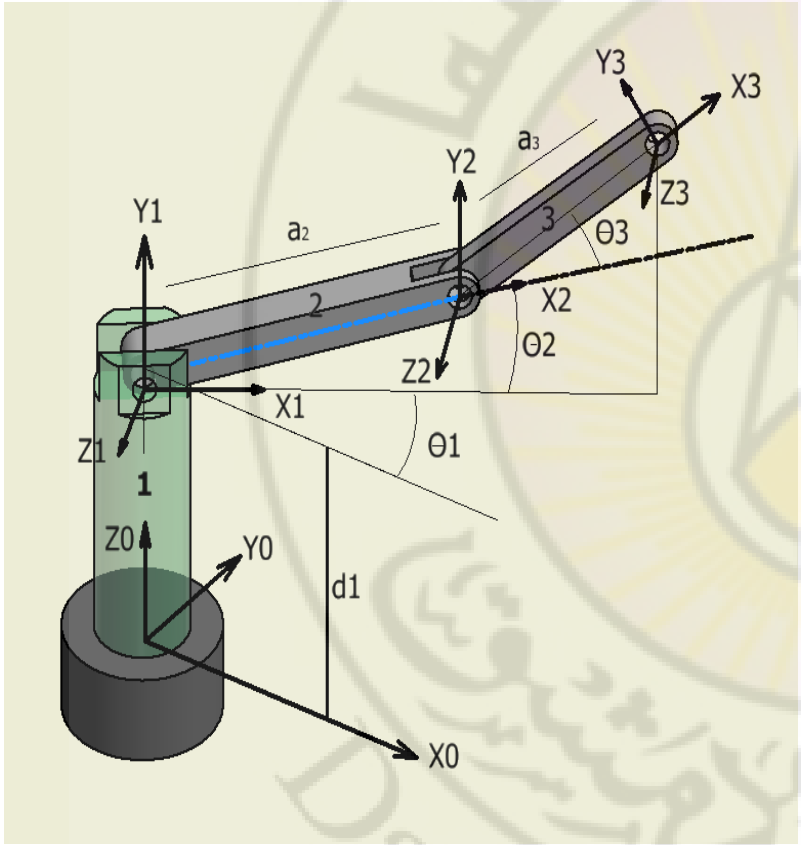
هي تنصيب المحاور وهنا يجب الانتباه واتباع القواعد المذكورة سابقاً.

تدور الوصلة الأولى (C_2) حول المحور (Z1) ويتم اختيار المحور(X0) بشكل تحكمي ليكون عمودي على محور الوتد عند أسفل الدعامة.
الوصلتان الأخيرتان (C3,C2) متمفصلتان كما يبدو في الشكل السابق .



ذراع آلية مؤلفة من ثلاث وصلات دورانية

الدراسة الحركية لذراع روبوت



- المحور (Z1) هو محور المفصل عند قمة الدعامة والمحور(X1) عمودي على المستوي المعين بالمحورين (Z0) و(Z1).كلا المحورين (Z2) و(Z3) موازيان للمحور (Z1).
- يتوضع المحور (X2) على طول الوصلة (C2) والمحور (X3) على طول الوصلة(C3).

الدراسة الحركية لذراع روبوت

- يمكننا أن ننشئ جدولاً يعطي بارامترات كل وصلة من الوصلات الثلاثة كما يلي:

Link	θ	d	a	α
1	θ1	d1	0	+90°
2	θ2	0	a2	0
3	θ3	0	a3	0

- نلاحظ أن المتغيرات هي ثلاثة (θ1) و(θ2) و(θ3) وباقي البارامترات هي ثوابت.
- نلاحظ أن (a)هي أقصر مسافة بين المحاور (Z) و(d) هي أقصر مسافة بين المحاور(X).
- وبتطبيق المصفوفة العامة على الجدول السابق نحصل على المصفوفات الجزئية:

$$ {}_0[A]_n = \begin{bmatrix} C\theta_i & S\theta_i C\theta_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_1 S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

الدراسة الحركية لذراع روبوت

وبالتالي فإن مصفوفات الوصلات(A)هي:

$$ {}_0[A]_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}_1[A]_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & a_2C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a_2S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}_2[A]_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_3C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_3S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

الدراسة الحركية لذراع روبوت

مصفوفة التحويل الكلية :

$$ {}_0[A]_3 = {}_0[A]_1 * {}_1[A]_2 * {}_2[A]_3 $$

$$ = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & a_2C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a_2S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_3C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_3S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ A_{11} = \cos\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) $$

$$ A_{12} = -\cos\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) $$

$$ A_{13} = \sin\theta_1 $$

$$ A_{14} = \cos\theta_1 \left[a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2 \right] $$

$$ A_{21} = -\sin\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) $$

$$ A_{23} = -\cos\theta_1 $$

$$ A_{24} = \sin\theta_1 \left[a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2 \right] $$

$$ A_{31} = \sin(\theta_2 + \theta_3) $$

$$ A_{32} = \cos(\theta_2 + \theta_3) $$

$$ A_{33} = 0 $$

$$ A_{34} = a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \sin\theta_2 + d_1 $$

$$ A_{41} = 0 $$

$$ A_{42} = 0 $$

$$ A_{43} = 0 $$

$$ A_{44} = 0 $$

الدراسة الحركية لذراع روبوت

- يتم ايجاد مبدأ المحاور 3(XYZ): $(\hat{p}_0) = {}_0[A]_3 * (\hat{p}_3)$
- بما أن : $(\hat{p}_3) = (0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 1)^T$
- فإن $x_0 = A_{14}$

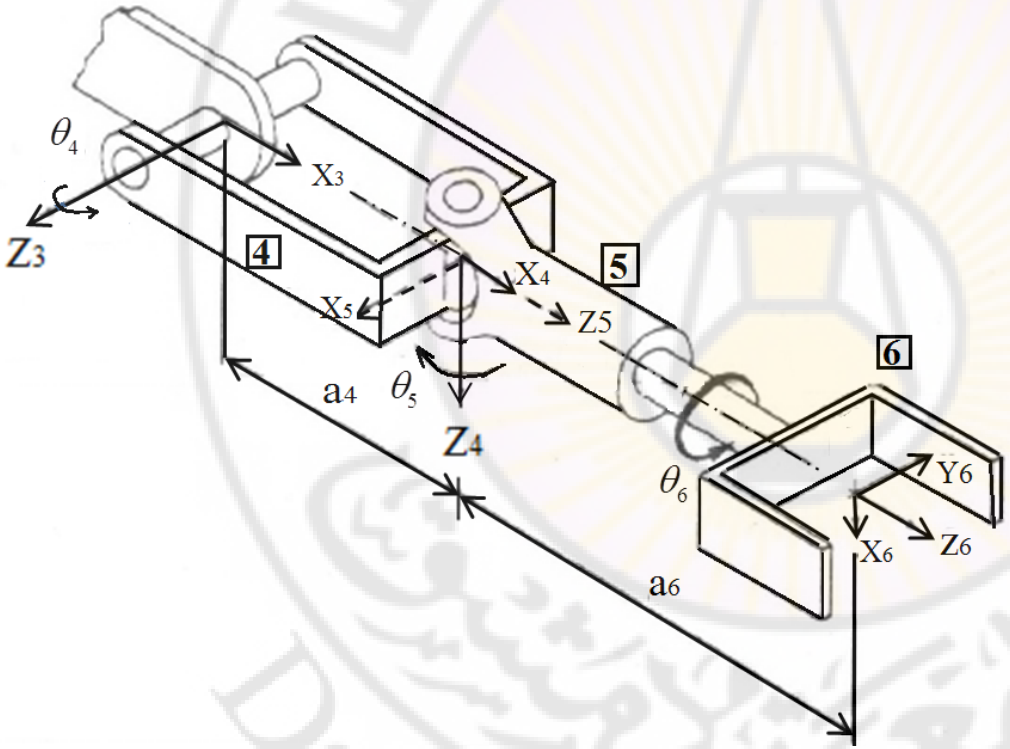
$y_0 = A_{24}$

$z_0 = A_{34}$

النهاية الطرفية

النهاية الطرفية البسيطة المبينة بالشكل حيث يمثل:

- المحور (Z3) محور التأرجح.
- المحور (Z4) محور الترنح.
- المحور (Z5) محور الدوران.



النهاية الطرفية

استناداً إلى توضع جملة المحاور الإحداثية عند المفاصل تعطى بارامترات الوصلات (٤,٥,٦) في الجدول التالي:

رقم الوصلة (Link)	θ	d	a	α
4	θ٤	0	a_4	+90°
5	θ5	0	0	+90°
6	θ6	d5	0	0

المصفوفة العامة:

$$ {}_3[A]_6 = \begin{bmatrix} C\theta_i & S\theta_i C\theta_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_1 S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

النهاية الطرفية

$$ {}_4[A]_5 = \begin{bmatrix} C\theta_5 & 0 & S\theta_5 & 0 \\ S\theta_5 & 0 & -C\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}_3[A]_4 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & S\theta_4 & a_4C\theta_4 \\ S\theta_4 & 0 & -C\theta_4 & a_4S\theta_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}_5[A]_6 = \begin{bmatrix} C\theta_6 & S\theta_6 & 0 & 0 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

مصفوفة التحويل الكلية للنهاية الطرفية هي: ${}_3[A]_6 = {}_3[A]_4 * {}_4[A]_5 * {}_5[A]_6$

النهاية الطرفية

$$A_{11} = \cos\theta_4 * \cos\theta_5 * \cos\theta_6 + \sin\theta_4 * \sin\theta_6$$
$$A_{12} = -\cos\theta_4 * \cos\theta * \sin\theta_6 + \sin\theta_4 * \cos\theta_6$$
$$A_{13} = \cos\theta_4 * \sin\theta_6$$
$$A_{14} = a_4 \cos\theta_4 + d6 * \cos\theta_4 * \sin\theta_5$$
$$A_{21} = \sin\theta_4 * \cos\theta_5 * \cos\theta_6 - \cos\theta_4 * \sin\theta_6$$
$$A_{23} = \sin\theta_4 * \sin\theta_5$$
$$A_{24} = a_4 \sin\theta_4 + d_6 \sin\theta_4 * \sin\theta_5$$

$$A_{31} = \sin\theta_5 * \cos\theta_6$$
$$A_{32} = -\sin\theta_5 * \sin\theta_6$$
$$A_{33} = -\cos\theta_5$$
$$A_{34} = -d_6 \cos\theta_5$$
$$A_{41} = 0$$
$$A_{42} = 0$$
$$A_{43} = 0$$
$$A_{44} = 1$$

في هذا المثال نفرض ان وضعية النهاية الطرفية على النحو التالي:

$$\theta_4 = 90^\circ,\ \theta_5 = 90^\circ,\ \theta_6 = 0^\circ$$

مصفوفة التحويل الكلية من جملة المحاور (XYZ)6 إلى جملة المحاور (XYZ)0 هي:

$$(\hat{p})_0 = {}_0[A]_6 * (\hat{p})_6 = {}_0[A]_3 * {}_3[A]_6 * (\hat{p})_6$$

النهاية الطرفية

- أو الصيغة العامة:

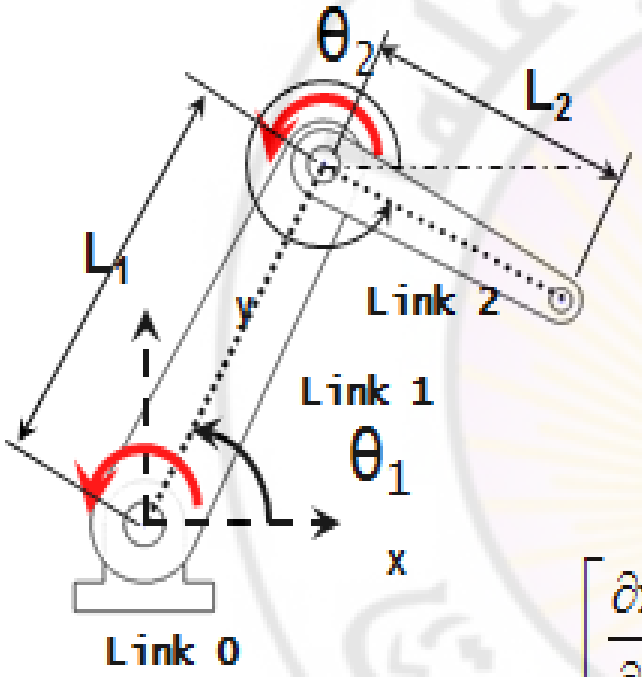
$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & S_x & a_x & r_x \\ n_y & S_y & a_y & r_y \\ n_z & S_z & a_z & r_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \\ 1 \end{bmatrix}$$

بوضع $Z_6 = 0,\ Y_6 = 0,\ X_6 = 0$ نجد أن (rx ry rz) هي مكان توضع مبدأ جملة المحاور (XYZ)6 ولو وضعنا $Z_6 = 0,\ Y_6 = 0,\ X_6 = 1$ يكون لدينا:

$$x_0 - r_x = n_x$$
$$y_0 - r_y = n_y$$
$$z_0 - r_z = n_z$$

إن (nx ny nz) هي التجييبات الموجهة للمحور (X6). ومكونات (s) هي التجييبات الموجهة للمحور (Y6). ومكونات (a) هي التجييبات الموجهة للمحور (Z6). هذه الاتجاهات يشار اليها بالتعامد، الانسحاب والاقتراب على التتالي، والمحاور المنسحبة هي اتجاه اللقط.

مواصفات اليعقوبي



بالإسقاط على المحورين (X,Y) نجد ما يلي:

$$L_1 Cos\theta_1 + L_2 Cos\theta_2 = x_e(\theta_1, \theta_2)$$

$$L_1 Sin\theta_1 + L_2 Sin\theta_2 = y_e(\theta_1, \theta_2)$$

$$dx = J\,dq$$

$$dx = \begin{pmatrix} dx_e \\ dy_e \end{pmatrix} \quad , \quad dq = \begin{pmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{pmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_e}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_e}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y_e}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_e}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} \qquad J = \begin{bmatrix} -L_1 Sin\theta_1 & -L_2 Sin\theta_2 \\ L_1 Cos\theta_1 & L_2 Cos\theta_2 \end{bmatrix}$$

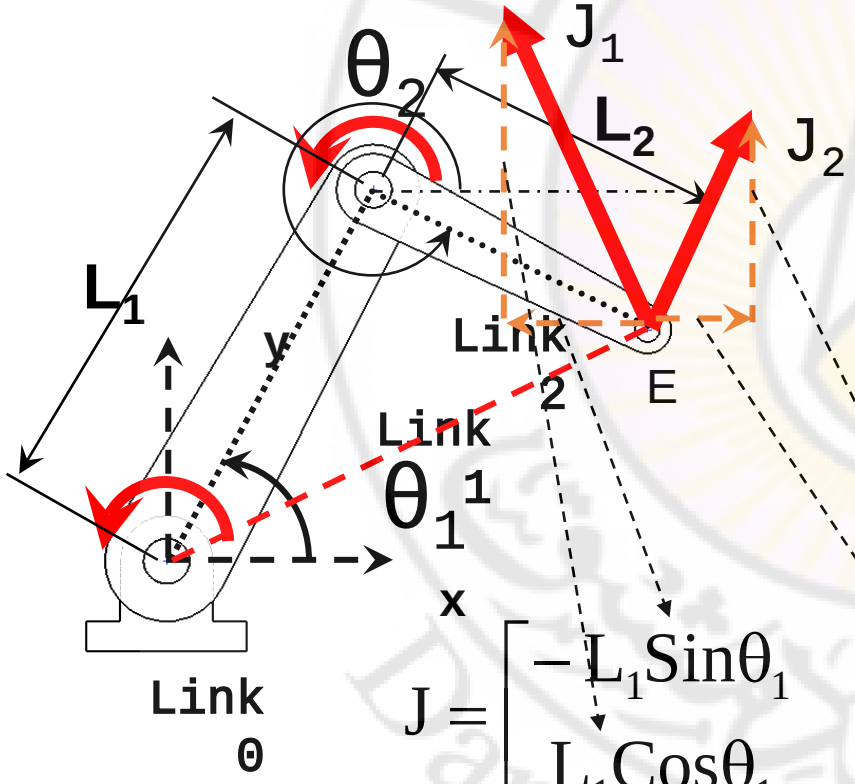
Damascus University

مواصفات اليعقوبي

- مركبات السرعة: $v_e = \begin{Bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}e \end{Bmatrix}$
- مشتق الموضع بالنسبة للزمن: $\frac{dx_e}{dt} = J\frac{dq}{dt}$ وبالتالي تكون السرعة $v_e = J\,\dot{q}$
- يلعب اليعقوبي دوراً هاماً في التحليل والتصميم والتحكم في النظم الروبوتية، ويمكن التعبير عنه في المركبتين التاليتين. $J = (J_1, J_2), \quad J_1 \; and \; J_2 \in \Re^{2x1}$
- إذن علاقة السرعة تعطى كالتالي: $v_e = J_1\,\dot{\theta}_1 + J_2\,\dot{\theta}_2$
- الحد الأول من الجانب الأيمن للمعادلة يحسب سرعة النهاية الطرفية الناتجة عن المفصل الأول فقط. بينما الحد الثاني يمثل السرعة الناتجة عن حركة المفصل الثاني. سرعة النهاية الطرفية الناتجة تعطى كمحصلة لأشعة السرعتين. كل شعاع من المصفوفة اليعقوبية يمثل سرعة النهاية الطرفية المولدة من حركة المفصل المطابق لشعاع الوحدة للسرعة عندما تكون المفاصل الأخرى ساكنة.

يبين الشكل عمود اشعة اليعقوبي (j1) و(j2) لذراع روبوتية بدرجتي حرية في الفضاء الثنائي الأبعاد. شعاع اليعقوبي (j2) معطى بالعمود الثاني من المصفوفة اليعقوبية، نقاطه تقع في الاتجاه العمودي على الذراع (L2) مع الملاحظة بأن الشعاع (j1) ليس عمودياً على الذراع (L1) وإنما عمودي على الخط (OE)، وهو الخط الواصل بين المفصل الأول ونهاية الذراع الثاني في النقطة (E).

تمثيل أشعة السرعة



$$J = \begin{bmatrix} -L_1 \mathrm{Sin}\theta_1 & -L_2 \mathrm{Sin}\theta_2 \\ L_1 \mathrm{Cos}\theta_1 & L_2 \mathrm{Cos}\theta_2 \end{bmatrix}$$

مواصفات اليعقوبي

J1 يمثل سرعة المفصل (١) عندما يكون المفصل (٢) ساكناً. وبعبارة اخرى الوصلتان (١) و(٢) متصلتان بمتانة لتصبحان كجسم واحد ونعاملهما كوصلة واحدة طولها (OE)، وسرعة المفصل (**J1**) تمر من رأس الوصلة (OE).

بصورة عامة، كل عمود اشعة من المصفوفة اليعقوبية يمثل سرعتي للنهاية الطرفية (السرعة الخطية – السرعة الزاوية) المولدتان بشكل مستقل لسرعة المفصل بينما المفاصل الأخرى ساكنة.

لتكن ($\dot{p}$) السرعة الخطية والزاوية للنهاية الطرفية أو بشكل مختصر سرعة النهاية الخطية، ويكون (J_i) العمود (i) من المصفوفة اليعقوبية. تعطى سرعة النهاية الطرفية كمجموع خطي لأشعة اعمدة المصفوفة الممثل لسرعة كل مفصل على حدة.

$$\dot{p} = J_1.\dot{q}_1 + ... + J_n.\dot{q}_n$$

حيث (n) عدد المفاصل الفعالة.

مواصفات اليعقوبي

إن سرعة النهاية الطرفية هي محصلة الأشعة لعمودي المصفوفة اليعقوبية لـ (J1,J2). لذلك سرعة النهاية الطرفية تتعلق في قيمة واتجاه الأشعة (J1,J2) المقاسة في الفضاء الثنائي.

إذا كان اتجاه الشعاعين مختلفاً فالشعاع الناتج هو المحصلة الخطية للشعاعين. هذا يعني ان النهاية الطرفية تتحرك في اتجاه كيفي وسرعة كيفية. ومن ناحية اخرى إذا كانت اعمدة الشعاعين متوافقة، فإن النهاية الطرفية لا تتحرك باتجاه كيفي. وهذا يمكن ان يحدث في وضعية خاصة للذراع حيث تكون الوصلتان (الذراعان) إما منفردتان او منقبضتان. وهذه الوضعية للذراع تشير إلى الوضع المنفرد (الأحادي). وفقاً لذلك المصفوفة اليعقوبية تصبح احادية في هذه الوضعيات . باستخدام محدد المصفوفة يمكن الحصول على الوضعيات الشاذة للروبوت.

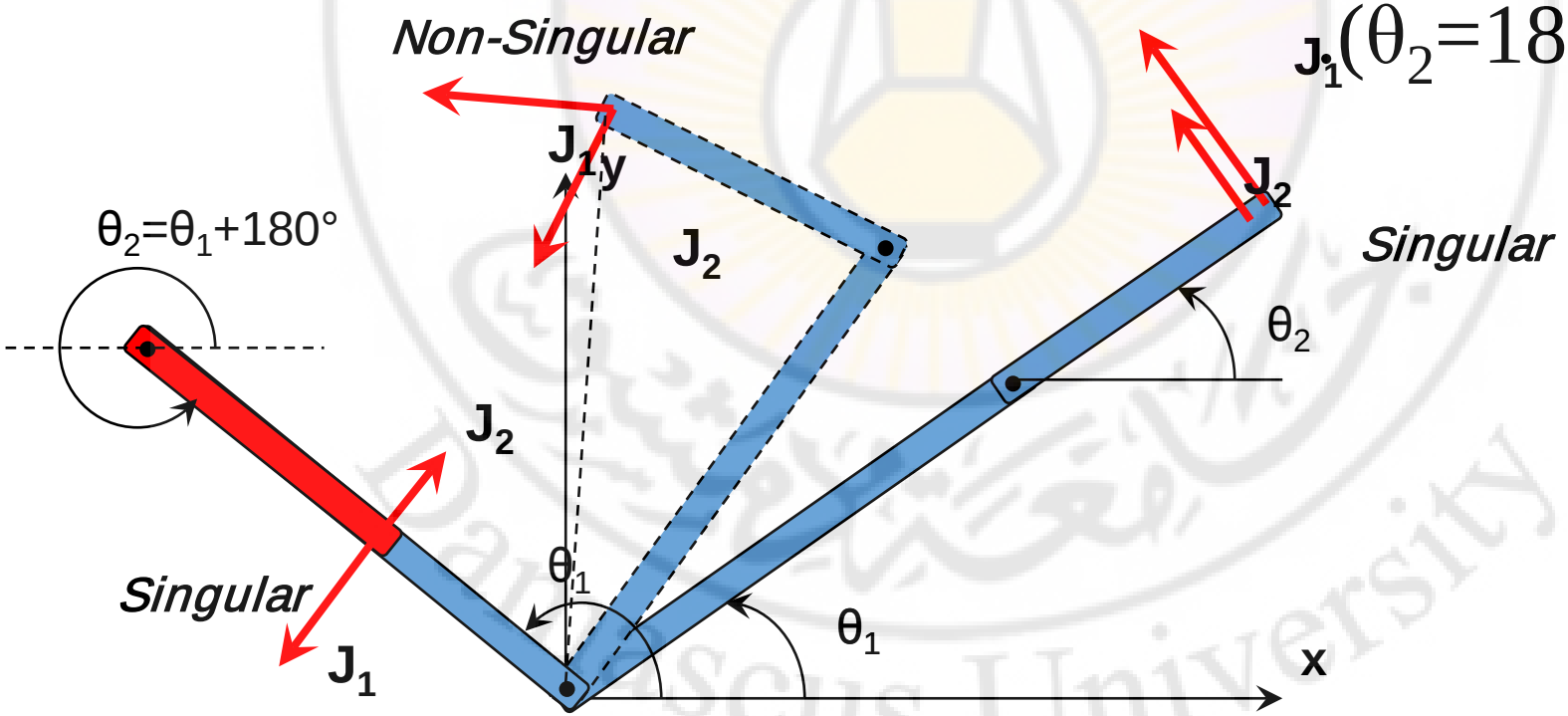
$$\det J = 0$$

مواصفات اليعقوبي

$$J = \begin{bmatrix} -L_1 Sin\theta_1 & -L_2 Sin\theta_2 \\ L_1 Cos\theta_1 & L_2 Cos\theta_2 \end{bmatrix}$$

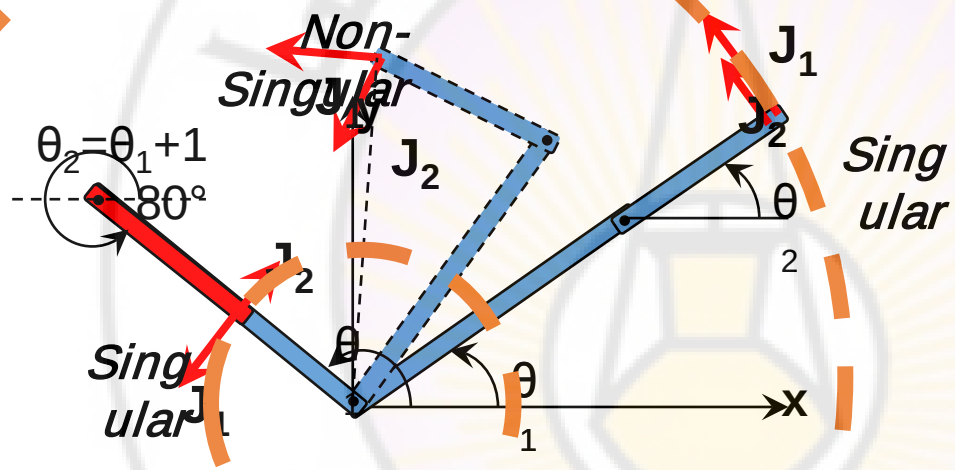
تكون نقاط الأشعة (J1) و (J2) في نفس الاتجاه إذا تحقق ما يلي: ($\theta_1=\theta_2$)

وفي اتجاهين متعاكسين $J_1(\theta_2=180+\theta_1)$



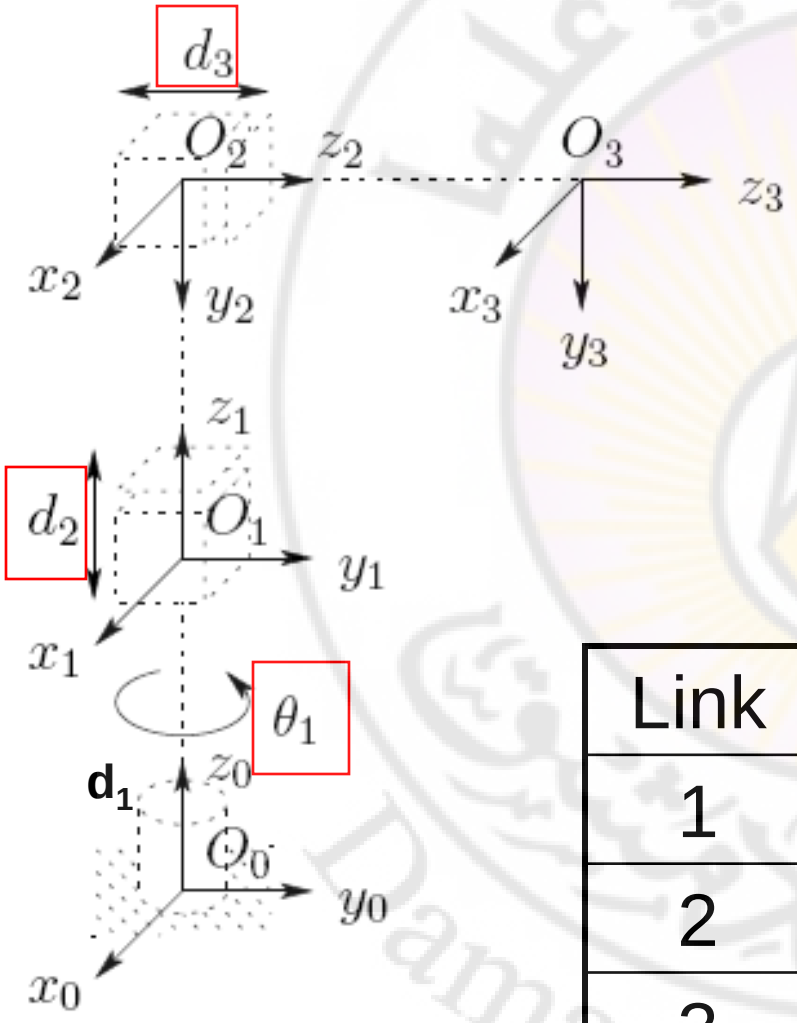
مواصفات اليعقوبي

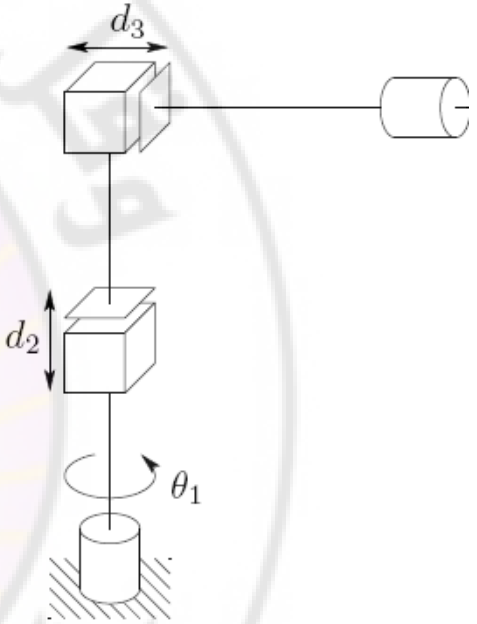
- فضاء العمل للذراع الروبوتية يتحدد من الشكل المبين حيث نجد الوضعية الشاذة للنهاية الطرفية في الحالتين (Singular).
- الحالة الأولى عندما تكون الذراعان ممدودتان.
- الحالة الثانية عندما تكون الذراع الثانية ملتفة على الأولى.



Robot manipulator is singular at its workspace boundaries.

مثال: ذراع اسطواني ذو ثلاثة وصلات (دورانية – انسحابيه – انسحابيه - دورانية).





بارامترات الوصلات

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	0	d_1	θ_1
2	0	-90	d_2	0
3	0	0	d_3	0

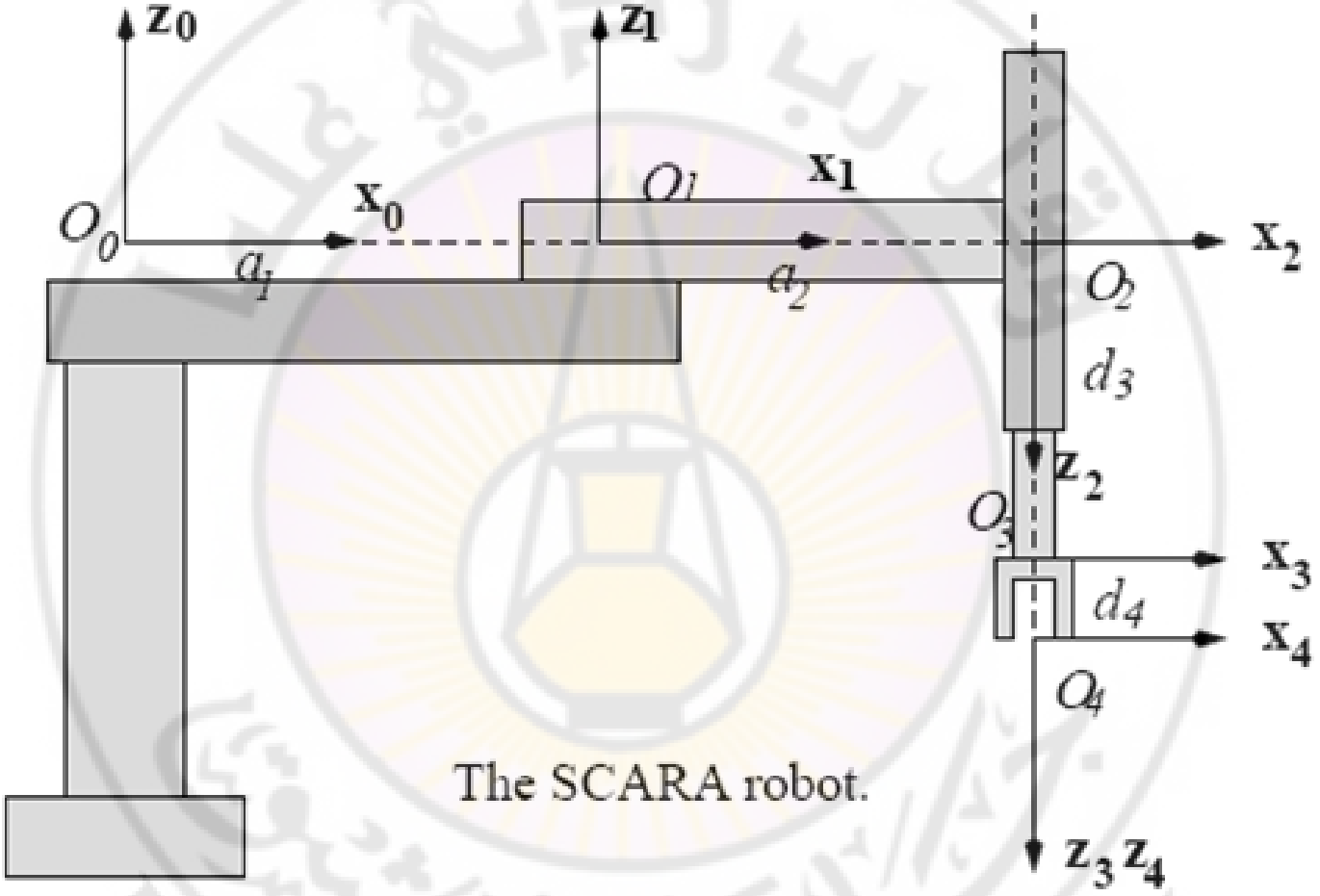
$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^0 = T = A_1 A_2 A_3 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & -s_1 d_3 \\ s_1 & 0 & c_1 & c_1 d_3 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Damascus University

SCARA MANIPULATOR •
ذراع روبوتية نوع سكارا

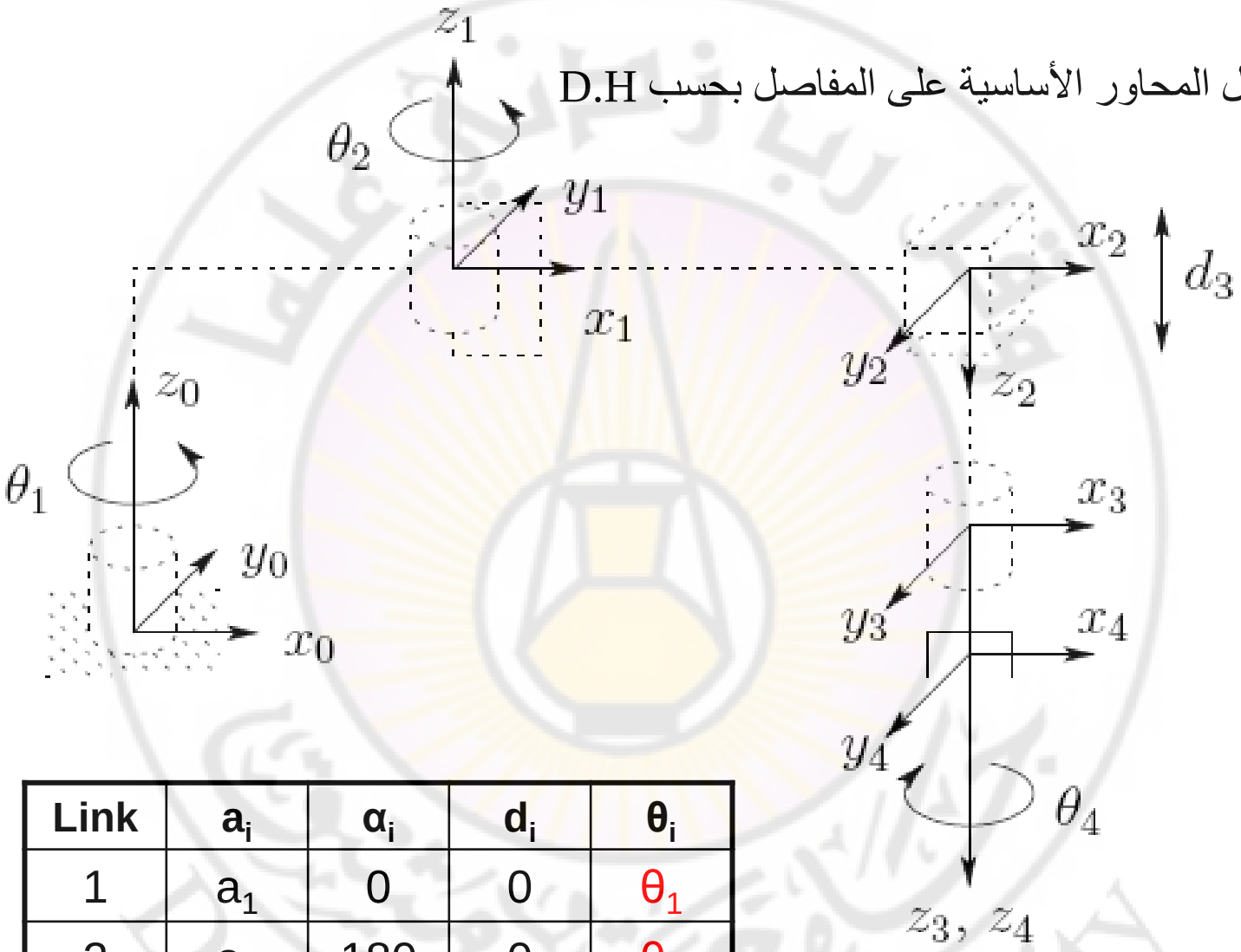
Damascus University



The SCARA robot.

Damascus University

توزيع جمل المحاور الأساسية على المفاصل بحسب D.H



Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	0	0	θ_1
2	a_2	180	0	θ_2
3	0	0	d_3	0
4	0	0	d_4	θ_4

$$A_1=\begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & a_1c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & a_1s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2=\begin{bmatrix} c_2 & s_2 & 0 & a_2c_2 \\ s_2 & -c_2 & 0 & a_2s_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_3=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

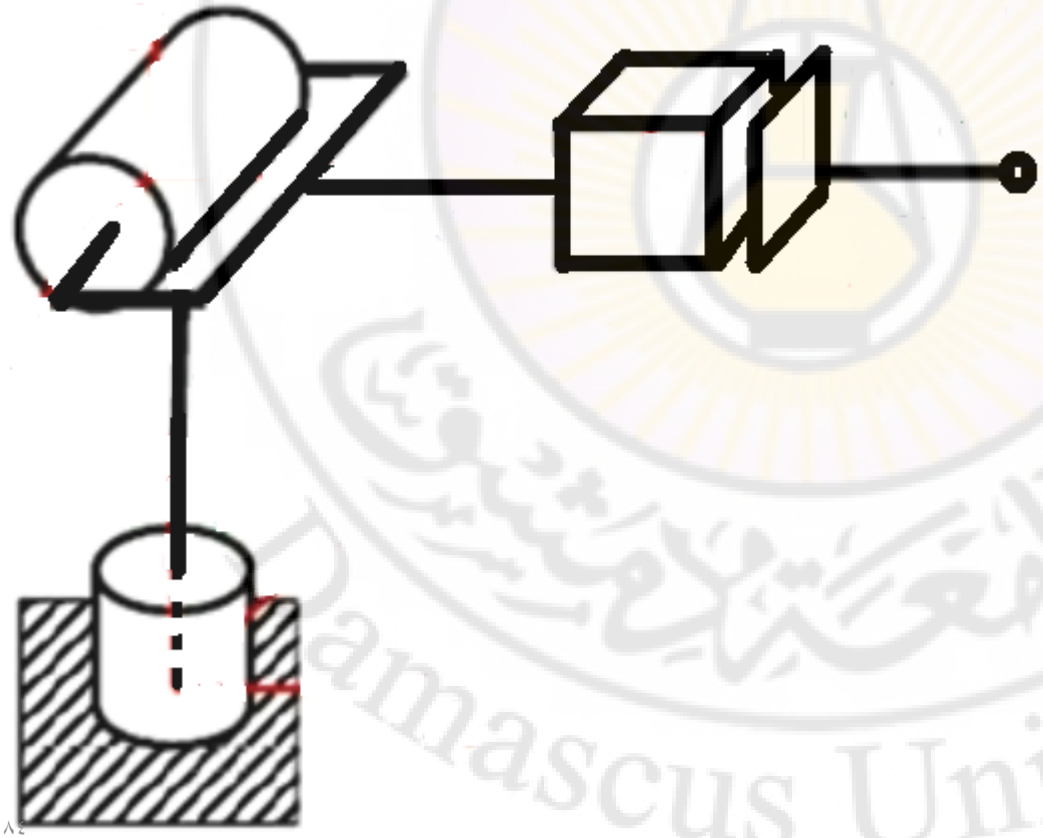
$$A_4=\begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

معادلات الانتقالات من مفصل إلى آخر وحساب الانتقال الكلي وبالتالي توضع النقطة النهائية للاقط.

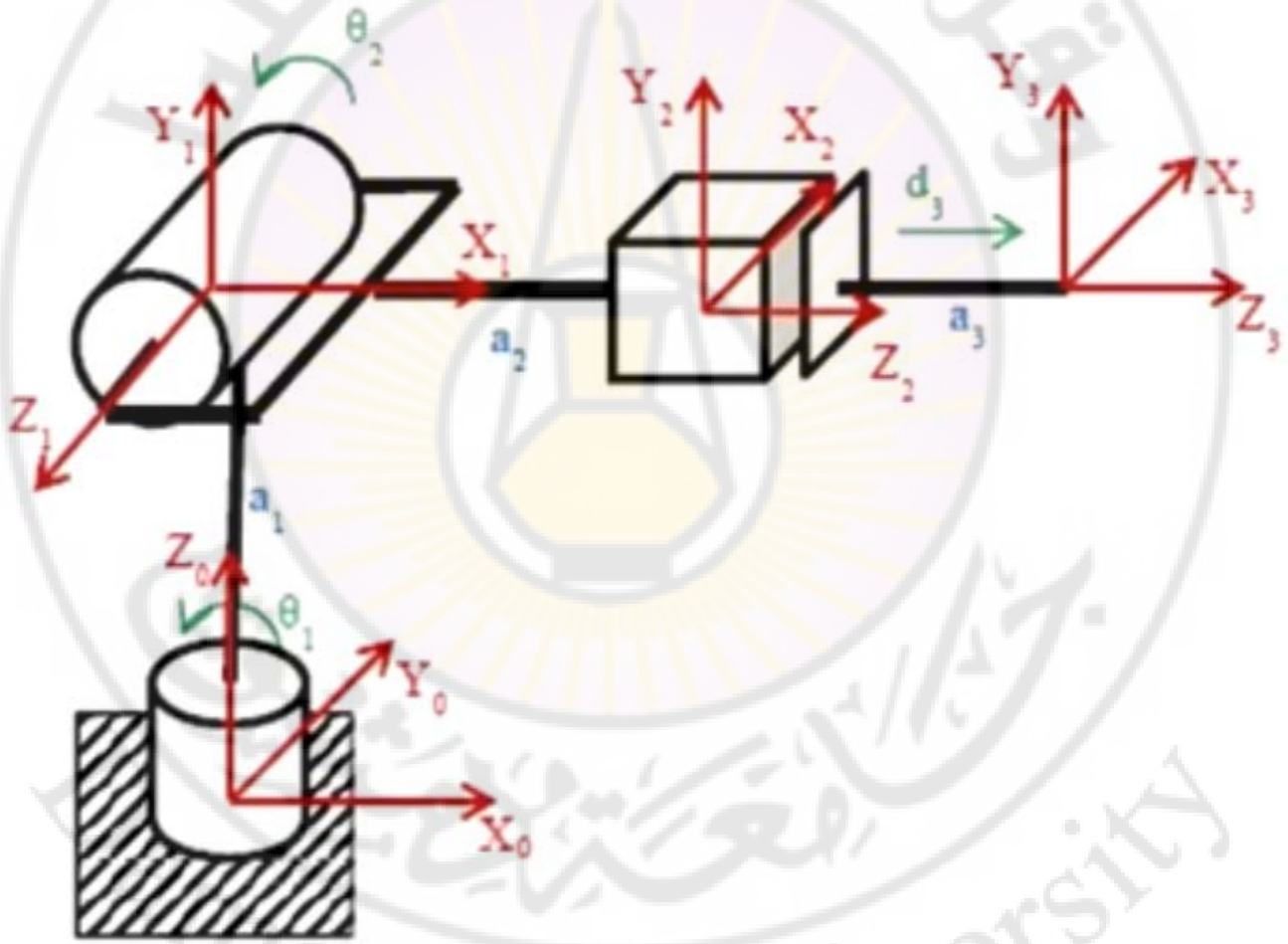
$$T_4^0=A_1A_2A_3A_4=\begin{bmatrix} c_{12}c_4+s_{12}s_4 & -c_{12}s_4+s_{12}c_4 & 0 & a_1c_1+a_2c_{12} \\ s_{12}c_4-c_{12}s_4 & -s_{12}s_4-c_{12}c_4 & 0 & a_1s_1+a_2s_{12} \\ 0 & 0 & -1 & -d_3-d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

مثال: ذراع كروي ذو ثلاثة مفاصل (دوراني – دوراني – انسحابي).

الروبوت الكروي هو أحد أنواع الروبوتات الصناعية حيث تصنع فيه الذراع شكل كرة في الفراغ. ويتكون هذا الروبوت من مفصلين دورانيين و مفصل ثالث يتحرك حركة خطية. ويكون لهذه الذراع قدرة أكبر على التعامل والحركة بسبب وجود مفصليين دورانيين ضمنه . وتكون عملية التحكم بهذا الروبوت أصعب من الأسطواني والديكارتي.



Spherical Manipulator



Damascus University

Forward Kinematic

$$A_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad A_2 = \begin{bmatrix} -S\theta_2 & 0 & C\theta_2 & a_2 C\theta_2 \\ C\theta_2 & 0 & S\theta_2 & a_2 S\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_3 + 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

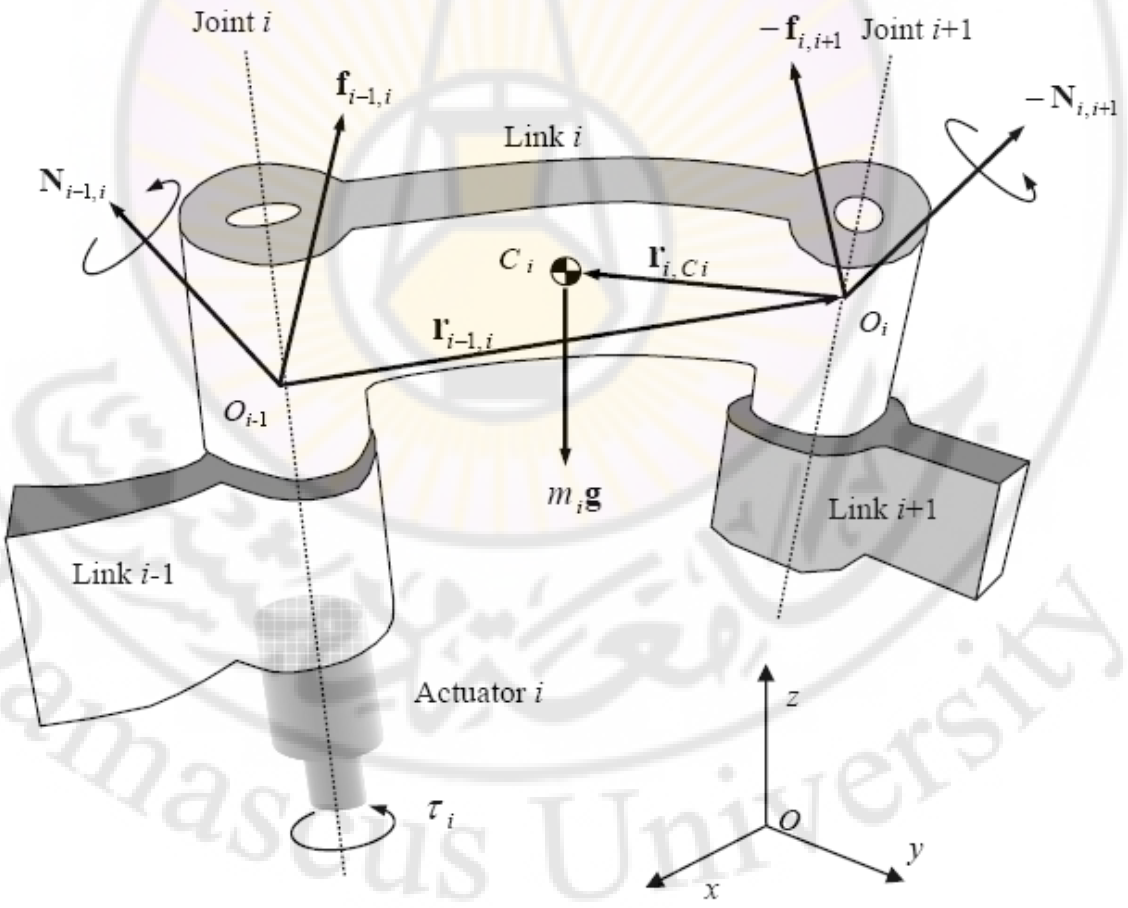
Inverse Kinematic

$$\theta_1 = a\tan\left(\frac{y_6^0}{x_6^0}\right) \qquad \theta_2 = -a\tan\left(\frac{a_{1-} z_6^0}{\sqrt{\left(x_6^0\right)^2 + \left(y_6^0\right)^2}}\right)$$

توزيع القوى والعزوم على الوصلة (i).

يبين الشكل المحرك (Actuator) الموجود على المفصل (i)، يؤثر على الوصلة (Link 1) ما يلي:

- قوة من الوصلة (Link i-1) مقدارها (fi-1,1).
- قوة من الوصلة (Link i+ 1) مقدارها (fi,i+1).
- قوة ناتجة عن وزن الوصلة في مركز ثقلها مقدارها (mi g).



توزيع القوى والعزوم على الوصلة (i).

عزوم الدوران المؤثرة على الوصلة (Link i) هي:

- عزم من الوصلة (Link i-1) مقداره (Ni-1,1).
- عزم من الوصلة (Link i+ 1) مقداره (Ni,i+1).

معادلات التوازن للوصلة (i):

$$f_{i-1,i} - f_{i,i+1} + m_i g = 0, \quad i = 1,\ldots,n$$

$$N_{i-1,i} - N_{i,i+1} - (r_{i-1,i} + r_{i,Ci}) \times f_{i-1,i} + (-r_{i,Ci}) \times (-f_{i,i+1}) = 0, \quad i = 1,\ldots,n$$

ENERGY METHOD AND EQUIVALENT JOINT TORQUES