مقدمة في علوم الروبوت
المحاضر: البروفيسور أسامة الخطيب
ملفات المحاضرات – الملف الخامس

توليد المسار
Trajectory Generation

توليد المسار

<u>المسألة الأساسية:</u>

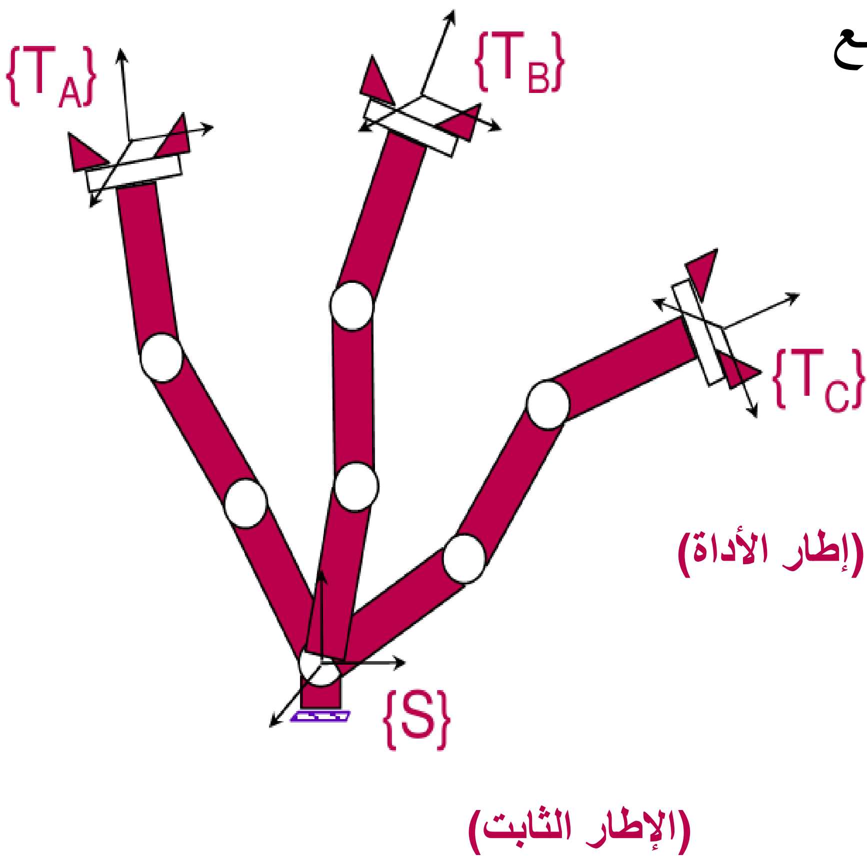
حرك الذراع الآلية من موضع البدء $\{T_a\}$ إلى الموضع النهائي المطلوب $\{T_c\}$

(من الممكن أن تمر ببعض نقاط العبور $\{T_b\}$)

نقاط المسار: ابتدائية، نهائية، نقطة عبور

<u>المسار:</u> هو السجل الزمني للموضع، السرعة والتسارع لكل درجة حرية.

القيود: فراغية، زمنية، الانسيابية.



فضاءات الحل

فضاء المفصل

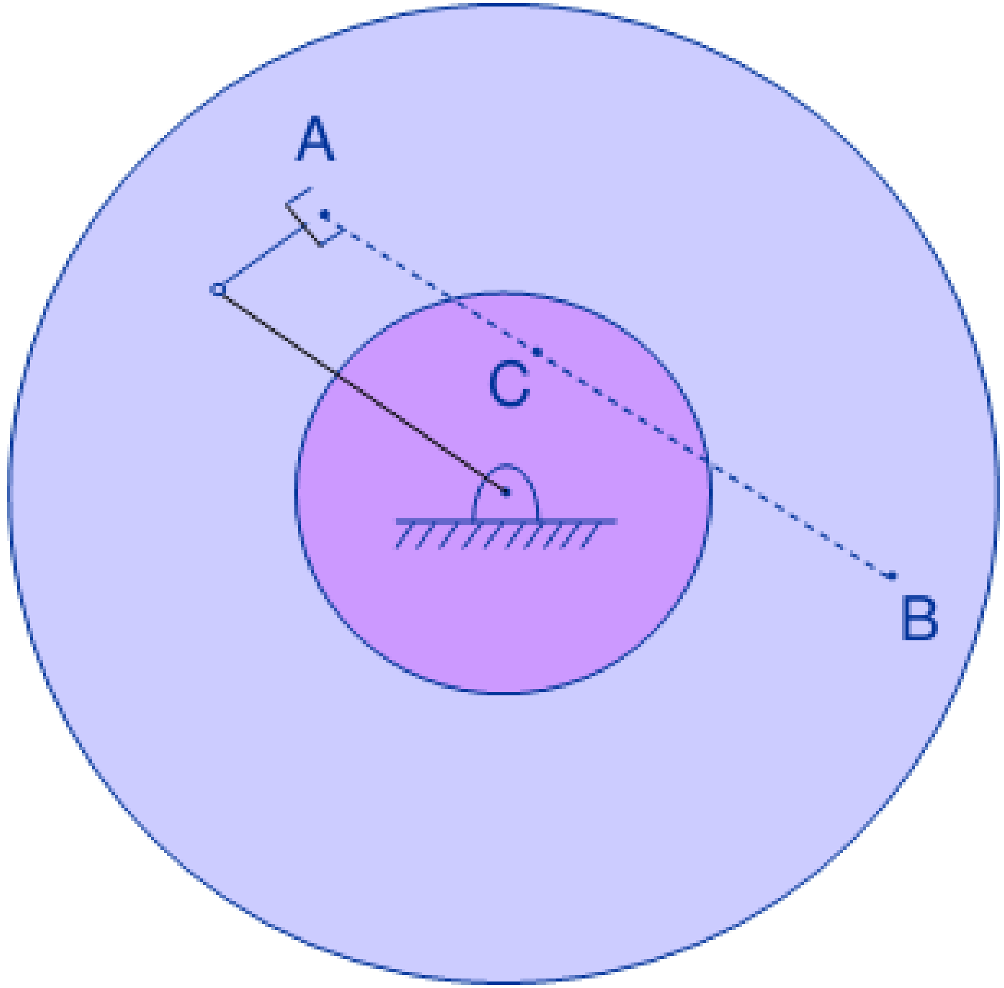
- سهولة بالانتقال عبر نقاط العبور (حل الدراسة الحركية العكسية عند جميع نقاط العبور ثم خطّط).
- لا توجد مشاكل بالنسبة للنقاط الشاذة.
- حسابات أقل.
- لا يمكن اتباع خط مستقيم.

الفضاء الديكارتي

- نستطيع تعقب شكل معيّن (من أجل التوجّه: المحاور المكافئة، زوايا أويلر) .
- زمن تشغيل أطول (نحتاج بعد حساب المسار إلى زوايا المفصل في عديد من النقاط).
- مشاكل الانقطاعات.

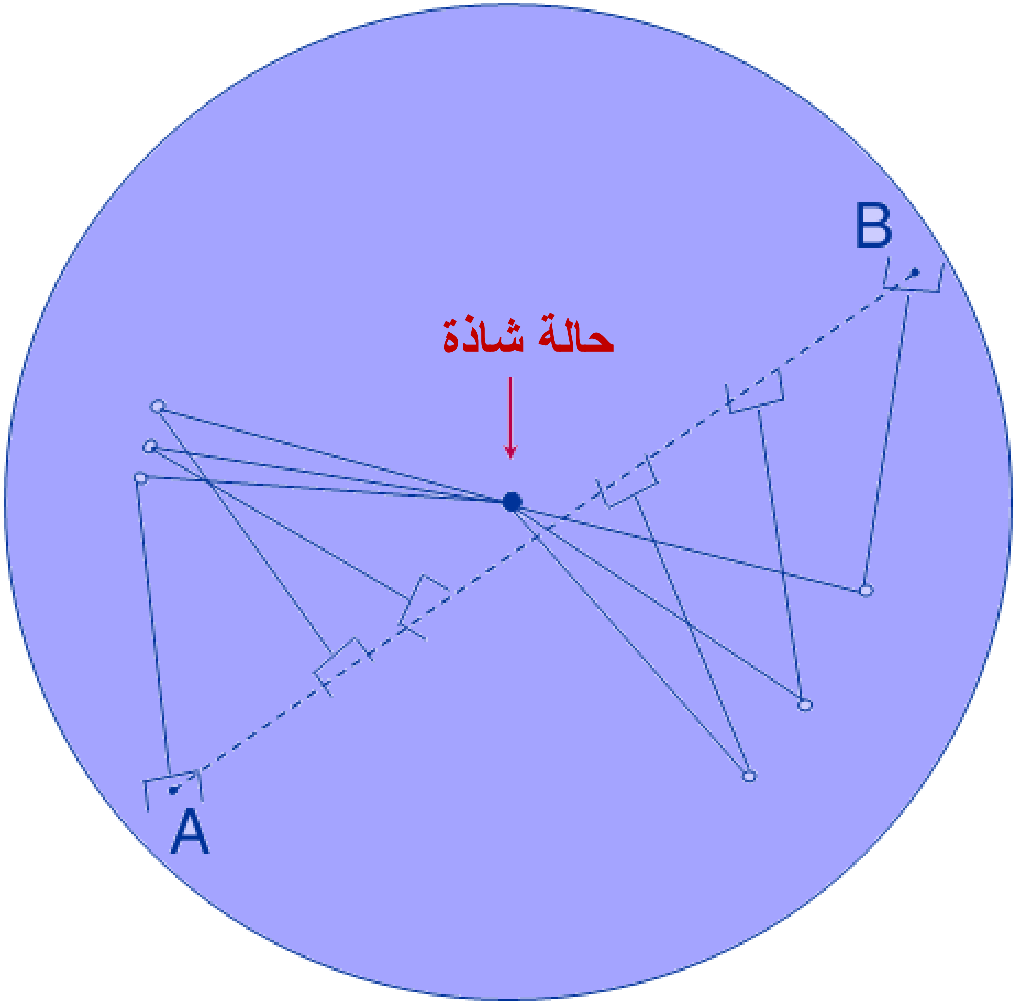
صعوبات التخطيط في الإحداثيات الديكارتية

- نقاط البدء ونقاط الهدف قابلة للوصول.
- النقاط الوسيطة (مثل النقطة C) غير قابلة للوصول.



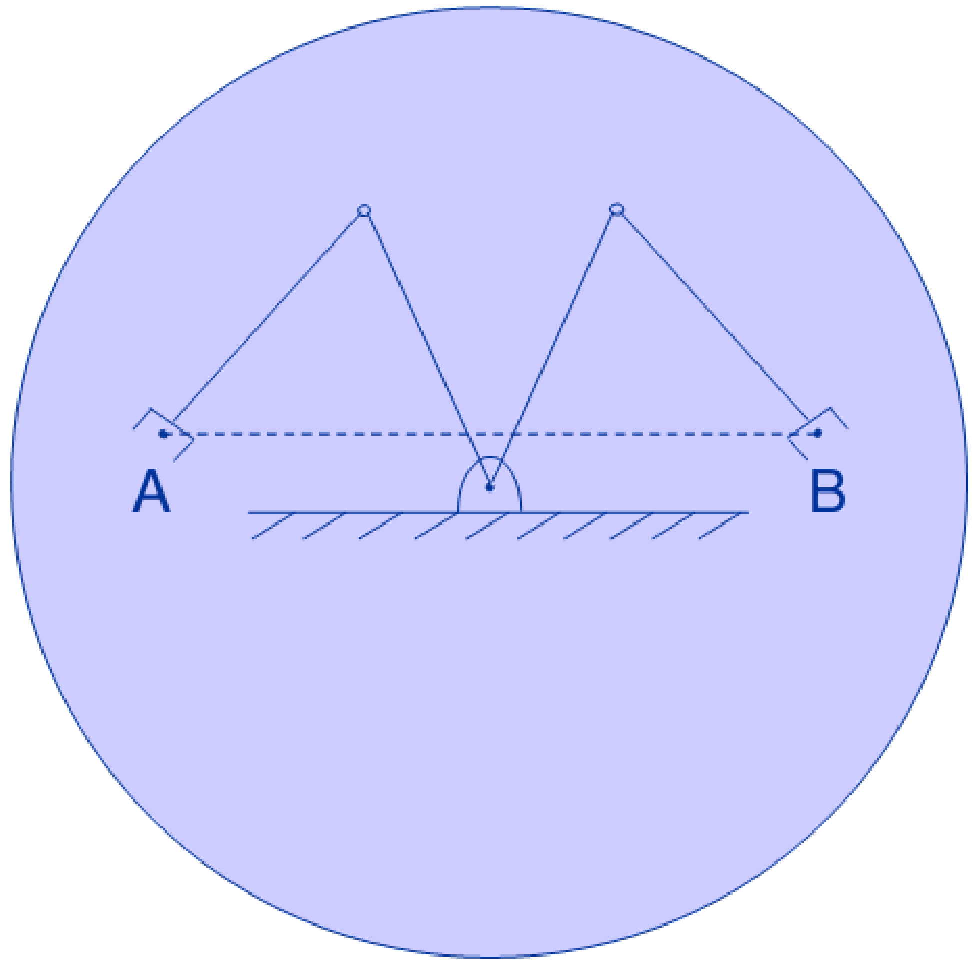
صعوبات التخطيط في الإحداثيات الديكارتية

بالاقتراب من الحالات الشاذة، تسعى بعض سرعات المفصل إلى اللانهاية مسببةً انحرافاً عن المسار.



صعوبات التخطيط في الإحداثيات الديكارتية

من الممكن الوصول إلى نقطة البداية (A) ونقطة الهدف (B) عبر العديد من الحلول ضمن فضاء المفصل.
يمكن الوصول إلى النقاط الموجودة في الوسط من الأسفل.



التخطيط الفعلي في أي فضاء

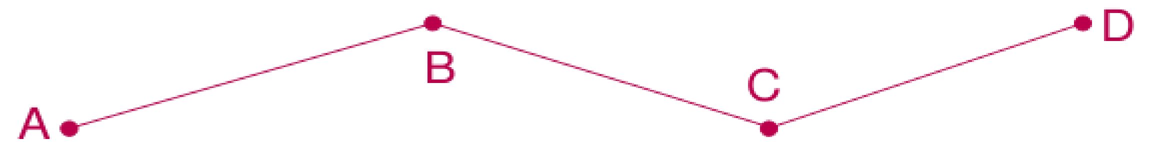
لنفرض لدينا المتحول العام <u>u</u>

يمكن أن يكون للموضع (x,y,z) أو التوجّه (α,β,γ)

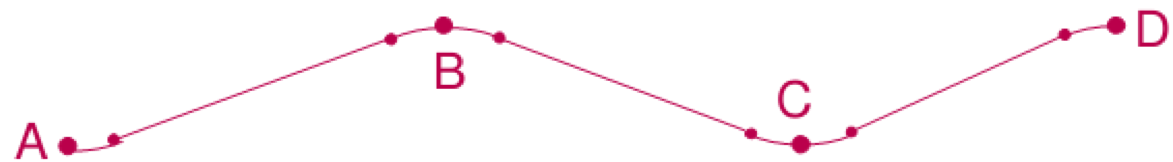
متحولات المفصل جيوب تمام الاتجاه

<u>المنحنيات المقترحة:</u>

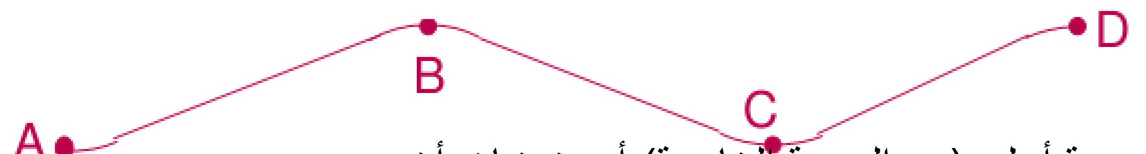
خط مستقيم (سنعاني من عدم استمرارية السرعة عند نقاط المسار)



خط مستقيم مع انحناءات

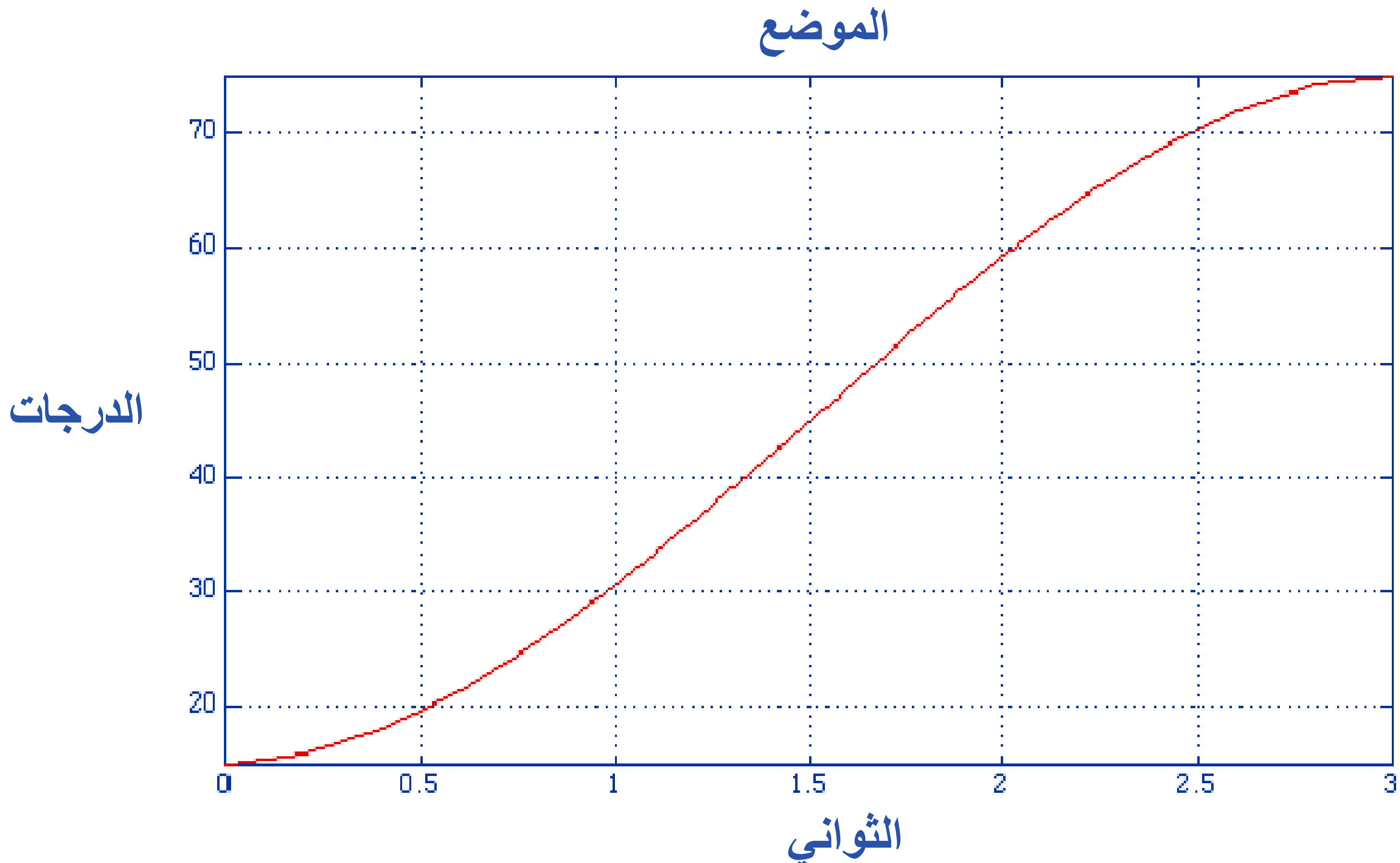


كثيرات الحدود التكعيبية (توابع استيفاء)



كثيرات الحدود من درجة أعلى (من الدرجة الخامسة) أو منحنيات أخرى

كثير الحدود التكعيبي بمتحول واحد

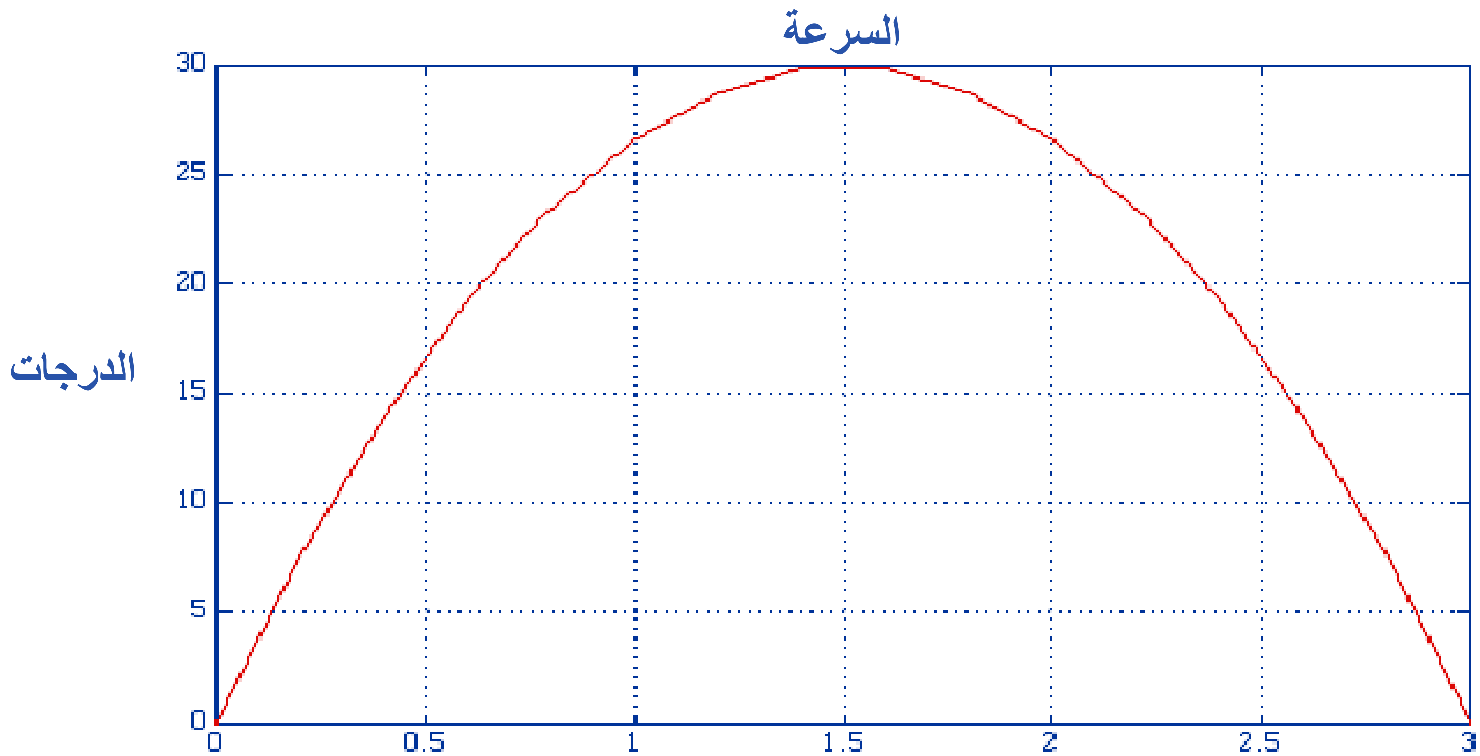


الشروط الابتدائية

$$u(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$$u(0) = u_0 \, ; u(t_f) = u_f$$

كثير الحدود التكعيبي بمتحول واحد



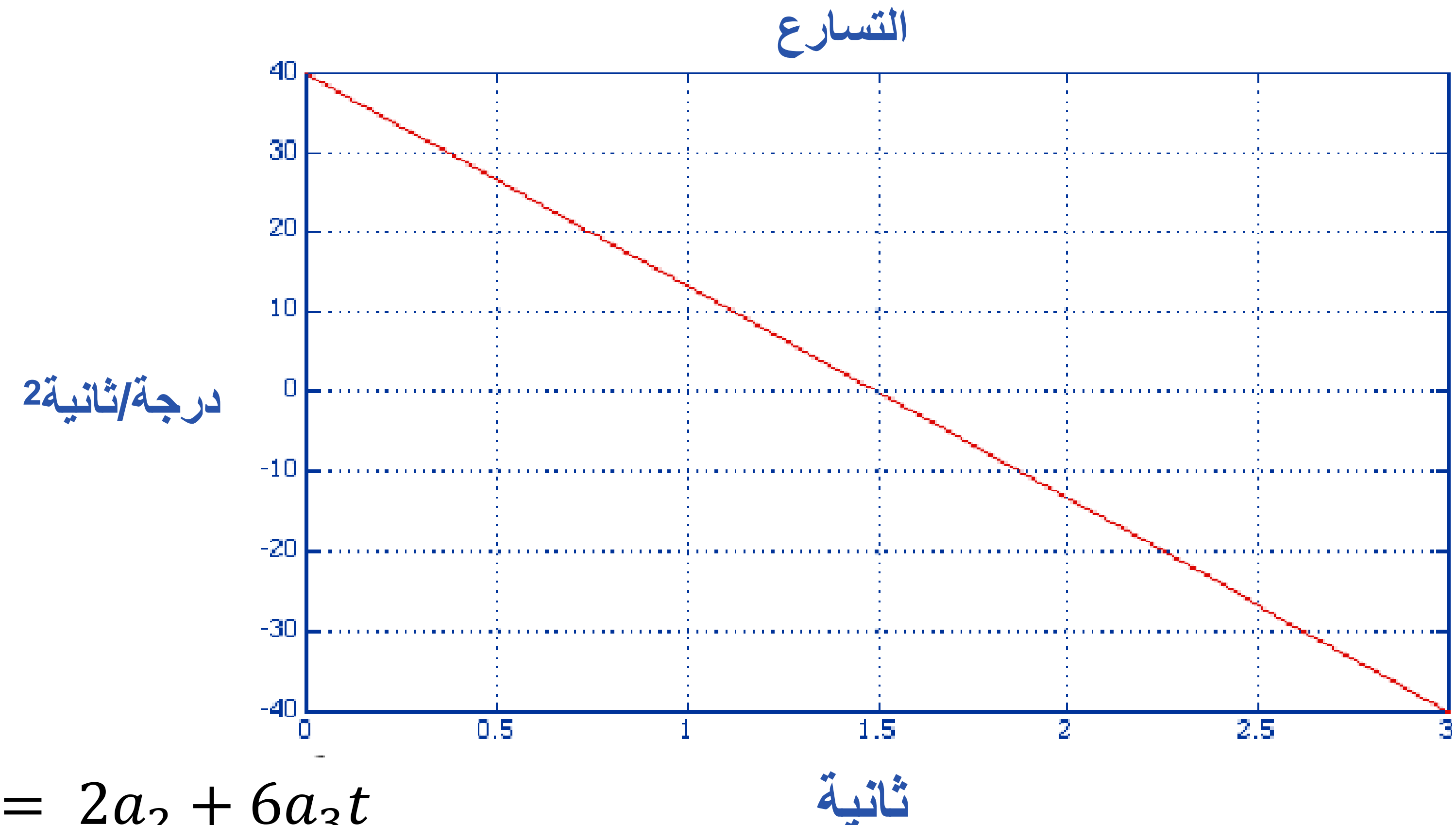
الشروط الابتدائية

$$\dot{u}(t) = \ a_1 t + 2a_2 t^2 + 3a_3 t^3$$

تبدأ وتنتهي في السكون

$$\dot{u}(0) = 0\,; \dot{u}(t_f) = 0$$

كثير الحدود التكعيبي بمتحول واحد



$$\ddot{u}(t) = 2a_2 + 6a_3 t$$

$$\dddot{u}(t) = 6a_3$$ (ثابت)

الحل:

$$u(t) = u_0 + \frac{3}{t_f^2}(u_f - u_0)t^2 + (-\frac{2}{t_f^3})(u_f - u_0)t^3$$

كثير الحدود التكعيبي عند نقاط العبور

- إذا كنا نصل إلى حالة السكون عند كل نقطة نستخدم المعادلة المعروضة في الشريحة السابقة.

- من أجل الحركة المستمرة (دون توقف) نحتاج إلى السرعة عند النقاط الوسيطة.

الشروط الابتدائية

$$\dot{u}(0) = \dot{u}_0$$
$$\dot{u}(t_f) = \dot{u}_f$$

الحل:

$$a_0 = u_0$$

$$a_1 = \dot{u}_0$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2}(u_f - u_0) - \frac{2}{t_f}\ddot{u}_0 - \frac{1}{t_f}\dot{u}_f$$

$$a_3 = \frac{2}{t_f^3}(u_f - u_0) - \frac{1}{t_f^2}(\dot{u}_f + \dot{u}_0)$$

كيف نحسب السرعة عند نقاط العبور ($\dot{u}_0, \dot{u}_f$ ...)

- إذا عرفنا السرعة الخطية والسرعة الزاوية في الإحداثيات الديكارتية

نستخدم ← $J-1$: $\boxed{\dot{u} = J-1\begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \omega \end{pmatrix}}$

- يختار النظام السرعات اللازمة باستعمال الطرق التجريبية (مثل: حساب متوسط السرعة على جانبي النقطة...إلخ)

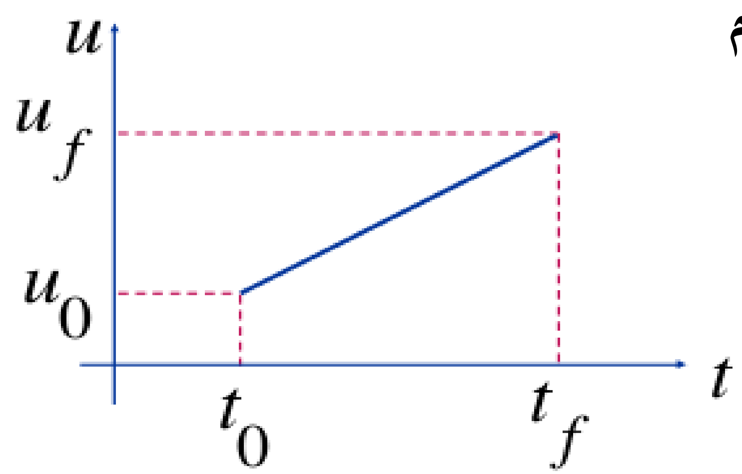
- يختار النظام السرعات المناسبة من أجل تحقيق استمرارية

السرعة $\dot{u}_1(t_f) = \dot{u}_2(0)$

التسارع $\ddot{u}_1(t_f) = \ddot{u}_2(0)$

الاستيفاء الخطي

الخط المستقيم



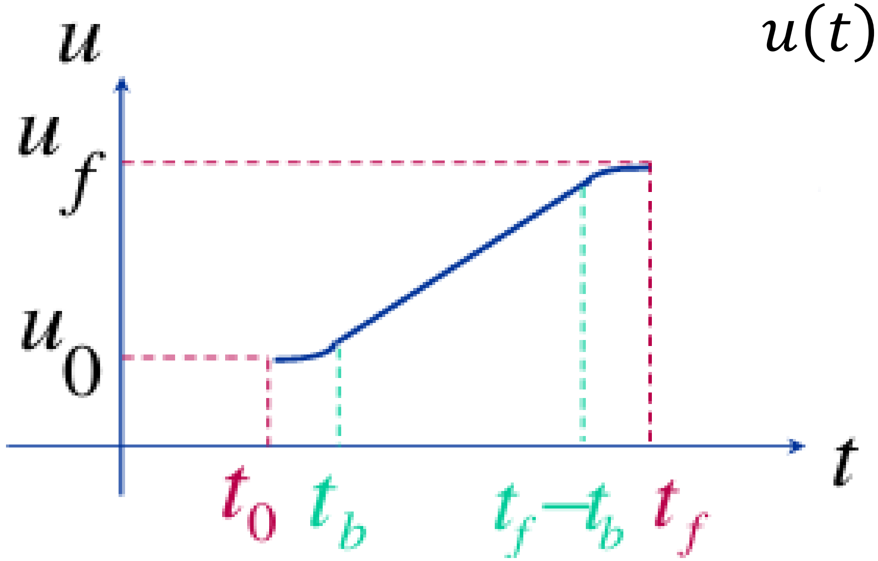
$$\boxed{u(t) = a_0 + a_1 t}$$

يوجد شرطان

$$u(t_0) = u_0$$
$$u(t_f) = u_f$$

لا يمكن التحكم بشكل جيد بسبب عدم استمرارية السرعة

الاستيفاء الخطي



- منحني التراكب القطعي: $u(t) = \frac{1}{2}at^2$

في مناطق التراكب تكون:

- السرعة خطية $\dot{u}(t) = at$
- التسارع ثابت $\ddot{u}(t) = a$

أو

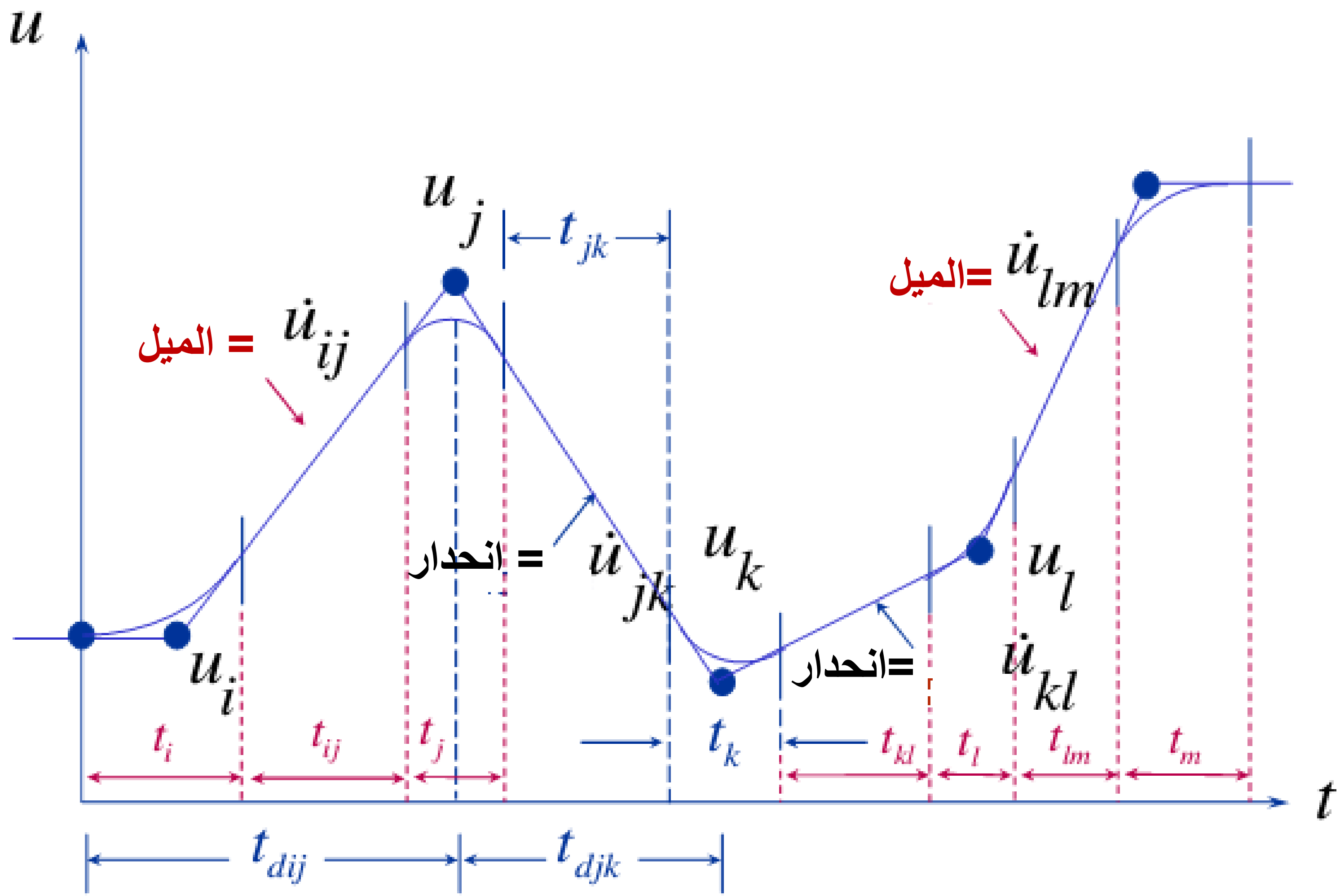
في مناطق التراكب: $u(t) = \frac{1}{2}\ddot{u}t^2$

- اعتماداً على السرعة المستمرة:

$$t_b = \frac{t}{2} - \frac{\sqrt{\ddot{u}t^2 - 4\ddot{u}(u - u_0)}}{2\ddot{u}}$$

حيث: $t = t_f - t_0$ هي المدة المطلوبة للحركة

الاستيفاء الخطي مع تراكب عدة أجزاء



بمعرفة:

- المواضع u_i, u_j, u_k, u_l, u_m
- المدة الزمنيّة المطلوبة $t_{dij}, t_{djk}, t_{dkl}, t_{dlm}$
- مطالات التسارعات $|\ddot{u}_i|, |\ddot{u}_j|, |\ddot{u}_k|, |\ddot{u}_l|$

احسب:

- زمن التراكب t_i, t_j, t_k, t_l, t_m
- زمن الجزء المستقيم $t_{ij}, t_{jk}, t_{kl}, t_{lm}$
- الميول (السرعات) $\dot{u}_{ij}, \dot{u}_{jk}, \dot{u}_{kl}, \dot{u}_{lm}$
- التسارعات مع إشارتها

المعادلات(7.24),(7.26) و (7.28)

يقوم النظام عادة بحساب أو استخدام القيم الافتراضية للتسارعات.

يمكن أن يحسب النظام أيضاً المدة الزمنيّة المطلوبة اعتماداً على القيم الافتراضية للسرعات.

الجزء الأوّل

$$\ddot{u}_1 = sign(u_2 - u_1)\left|\ddot{u}_1\right|$$

$$t_1 = t_{d12} - \sqrt{t_{d12}^2 - \frac{2(u_2 - u_1)}{\ddot{u}_1}}$$

$$\dot{u}_{12} = \frac{u_2 - u_1}{t_{d12} - \frac{1}{2}t_1}$$

$$t_{12} = t_{d12} - t_1 - \frac{1}{2}t_2$$

الجزء الداخلي

$$\dot{u}_{jk} = \frac{u_k - u_j}{t_{djk}}$$

$$\ddot{u}_k = sign(\dot{u}_{kl} - \dot{u}_{jk})\left|\ddot{u}_k\right|$$

$$t_k = \frac{\dot{u}_{kl} - \dot{u}_{jk}}{\ddot{u}_k}$$

$$t_{jk} = t_{djk} - \frac{1}{2}t_j - \frac{1}{2}t_k$$

الجزء الأخير

$$\ddot{u}_n = sign(u_{n-1} - u_n)\left|\ddot{u}_n\right|$$

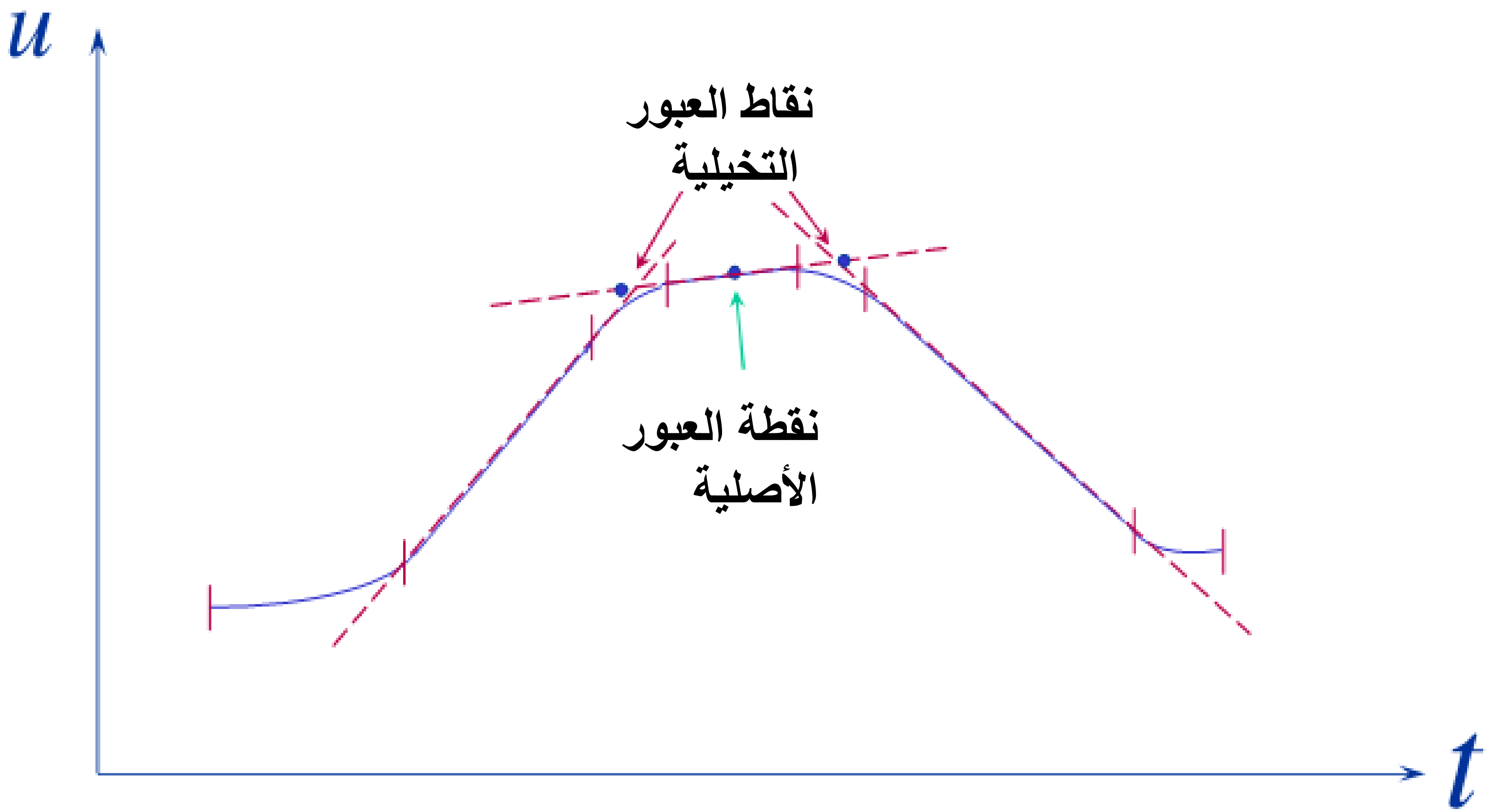
$$t_n = t_{d(n-1)n} - \sqrt{t_{d(n-1)n}^2 - \frac{2(u_n - u_{n-1})}{\ddot{u}_n}}$$

$$\dot{u}_{(n-1)n} = \frac{u_n - u_{n-1}}{t_{d(n-1)n} - \frac{1}{2}t_n}$$

$$t_{(n-1)n} = t_{d(n-1)n} - t_n - \frac{1}{2}t_{n-1}$$

من أجل المرور عبر نقاط العبور الفعلية

- عرّف (نقاط العبور التخيلية)



- نستعمل التسارعات الكبيرة بدرجة كافية.
- إذا أردنا التوقف هناك فنكرر نقطة العبور.

منحنيات التراكب القطعي عالية الرتبة

- مثلاً إذا كان لدينا:

ستة شروط:

الموضع	ابتدائي (u_0)، نهائي (u_f)
السرعة	$(\dot{u}_0, \dot{u}_f)$
التسارع	$(\ddot{u}_0, \ddot{u}_f)$

فاستخدم المعادلة من الدرجة الخامسة:

$$u(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$

وأوجد المقدار $\mathbf{a_i}$ (من i=0 حتى i=5) [المعادلات (7.18) في الكتاب]

استخدم توابع متعددة (الأسي، المثلثي،....)

زمن التنفيذ لتوليد المسار

- يقوم المسار المعرف بـ $\Theta, \dot{\Theta}, \ddot{\Theta}$ بتغذية نظام التحكم.
- يقوم مُولد المسار بالعمليات الحسابية خلال فترة زمنية معينة تسمى مُعدّل تحديث المسار.
- في فضاء المفصل مباشرة:

a) في الاستيفاء التكعيبي: قم بتغيير مجموعة المعاملات عند نهاية كل جزء.

b) في منحنيات التراكب القطعي: تحقق عند كل تحديث للمسار فيما إذا كنا في الجزء الخطي أو الجزء المنحني، واستخدم المعادلات المناسبة لـ u.

- في الفضاء الديكارتي:

a) قم بحساب الموضع والتوجه في الإحداثيات الديكارتية عند كل نقطة وتحديثها باستخدام نفس المعادلات.

b) قم بالتحويل إلى فضاء المفصل باستخدام مقلوب اليعقوبي والاشتقاق.

أو

أوجد تمثيل الإطار المكافئ واستخدم تابع الدراسة الحركية العكسية لإيجاد $\Theta, \dot{\Theta}, \ddot{\Theta}$.

تخطيط المسار بوجود العوائق

- **تخطيط المسار لكامل الذراع الآلية:**
  - مميزات تخطيط الحركة المحلي مقارنةً بالتخطيط العام:
    - تخطيط حركة كلّي للبيئات الخالية من العقبات.
    - تخطيط حركة دقيق لإطار المؤثر الطرفي.
  - مقاربة فضاء الوضعية C-space approach.
- **التخطيط لروبوت نقطيّ:**
  - تمثيل بياني للفضاء الحر(مخطط شجرة).
  - طريقة حقل الكمون الاصطناعي.
- الروبوتات المتعددة، الروبوتات و/أو العوائق المتحرّكة.