

مقدمة:

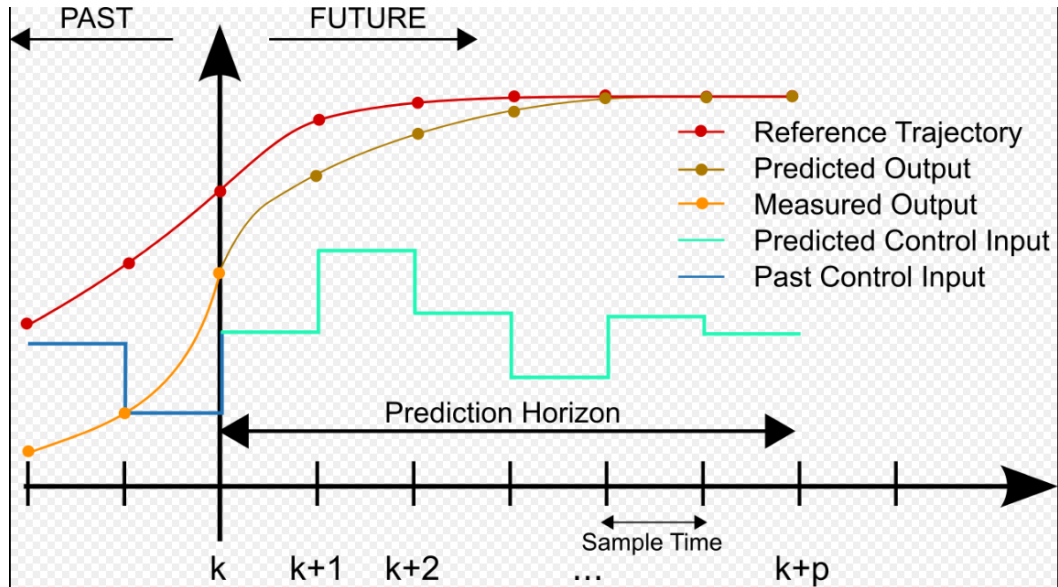
تسعى خوارزميات تصحيح المسار إلى جعل الآلات تكتسب مهارات القيادة الذاتية المختلفة بناءً على معايير التنفيذ المختلفة (الزمن، الاحداثيات، الأشياء،.....الخ)، وقد تمكنت هذه الخوارزمية من القفز بالآلات بشكل عام إلى مستوى كبير من الوعي بمتطلبات العمل، وكان لهذه التقنيات الحديثة دوراً هاماً في تمكين السيارات ذاتية القيادة من تجنب الكوارث المرورية بمستوى منافس للبشر، كما كانت عاملاً كبيراً في دقة التصنيع للدارات النانوية في معامل المعالجات بشكل خاص، وما إلى ذلك من الاستخدامات المتعددة.



الشكل (1): يوضح أول عملية زراعة أسنان ناجحة لروبوت ذكي

ومن التقنيات المستخدمة في هذه الأعمال خوارزميات تخطيط المسار للروبوت، ومن هذه الخوارزميات خوارزمية التناسب المتكامل المشتق (PID: Proportional-Integral-Derivative)، وخوارزمية المنظم الخطي التربيعي (LQR: Linear Quadratic Regulator)، وخوارزمية نموذج التحكم التنبؤي (MPC: Model Predictive Control) وهي المستخدمة في مشروعنا، ويعود سبب اختيارنا لخوارزمية MPC هو أن كل من خوارزمية PID و LQR تستخدم المخطط المرجعي لمسار الروبوت، وهذا يعني أن المسار المرجعي القادم من وحدة مخطط المسار هو إحداثيات النموذج إضافة إلى السرعة، ولكن لا يمكننا التأثير على كل من السرعة والموقع بشكل مباشر من خلال الخوارزميتين السابقتين، وهذا ما اضطرنا إلى استخدام خوارزمية MPC كونها تهتم بالتحكم بالمقايض الخاصة بالتحكم بمعيار المسار، ولفهم هذا الفرق الجوهرى سنفترض أنه لدينا سيارة نريد جعلها قادرة على القيادة الذاتية وفق مسار صحيح لمسار الطريق، إن وحدة تحكم كل من خوارزميتي PID, LQR تعملان على تصحيح المسار للسيارة وفقاً للمسار المرجعي وذلك بتحديد هذا المسار وتوجيه النظام فقط، بينما خوارزمية MPC تعمل على التأثير على المكابح بالإضافة إلى زاوية التوجيه للسيارة مع مراعاة زمن انتقال النظام بشكل أكثر فاعلية والقيود التشغيلية له وأيضاً ديناميكيات هذا النظام المتغيرة مع الزمن، وبالتالي فإن كانت ديناميكيات النظام خطية وثابتة مع الزمن (LTI) ولا توجد قيود تشغيلية له (كتقنيات IPS للمكابح) فإنها تتلخص

في وحدة التحكم الكلاسيكية لخوارزمية LQR، وبالتالي فإنها أكثر تعقيداً من الخوارزميتين السابقتين ولكن أكثر موثوقية منهما، والهدف منها هو تقليل دالة التكلفة المحددة مسبقاً مع تلبية قيود النظام وديناميكياته، ففي كل خطوة زمنية نحسب أفضل مجموعة من إجراءات التحكم التي تقلل وظيفة التكلفة خلال أفق زمني محدد واختيار الإجراء لأقرب خطوة زمنية وتكرر العملية في الخطوة التالية، كما يوضح الشكل أدناه.



الشكل (2): يوضح آلية عمل الخوارزمية في حالتي الثبات والتغير للنظام في كل خطوة زمنية

خوارزمية MPC:

كما ذكرنا سابقاً إن الهدف من الخوارزمية هو تقليل دالة التكلفة مع تلبية قيود المشغل وديناميكيات النظام، ويتم تمثيلها رياضياً كما يلي:

Given: \bar{x}_0

For $t=0, 1, 2, \dots, T$

- Solve $\min_{x,u} \sum_{k=t}^T c_k(x_k, u_k)$
s.t. $x_{k+1} = f(x_k, u_k), \quad \forall k \in \{t, t+1, \dots, T-1\}$
 $x_t = \bar{x}_t$
- Execute u_t
- Observe resulting state, \bar{x}_{t+1}

حيث أن: \mathbf{x} : هي حالة النظام، \mathbf{u} : هي دخل النظام من متغيرات، \mathbf{f} : هي ديناميكيات النظام.

تقوم الخوارزمية كما هو موضح مسبقاً بحساب دالة التكلفة وقيود النظام حتى نهاية الوقت T ، بحيث تقوم بإعادة تخطيط المسار بالكامل في كل خطوة زمنية، ولكن لدينا مشكلة هنا؛ هي أنه من الممكن أن يكون الزمن المدروس طويلاً جداً؛ ولذا اقترح الباحثون أن تقوم الخوارزمية بإعادة تخطيط كامل المسار إلى حد زمني ثابت H ، بحيث ينتقل مجموع التكلفة والقيود من $k = t$ إلى $k = t + H$ ولهذا السبب تُعرف الخوارزمية أيضاً باسم التحكم في الأفق (RHC: Receding Horizon Control).

خطوات الخوارزمية:

تستخدم الخوارزمية الخطوات التالية للتحكم بالنظام ابتداءً من حالة النظام الأولى:

1. اعتماداً على بيان المشكلة، اضبط نافذة الأفق عن طريق تحديد طول المسار المناسب (N) ومدة الخطوة الزمنية (dt : time-step duration).
2. باستخدام نقاط طريق المسار المرجعي المحدد من مخطط المسار قم بملاءمة منحنى متعدد الخطوط، والذي سنقوم باستخدامه لحساب أخطاء المسار المتقاطع والتوجيه.
3. باستخدام بيان المشكلة مرة أخرى حدد نموذجاً مناسباً لديناميكيات النظام.
4. حدد أي قيود مادية يجب إطاعتها.
5. باستخدام المسار المتقاطع وأخطاء التوجيه قم بإنشاء دالة التكلفة المناسبة لحلول الخوارزمية لتقليلها.

وإذا قمنا بمحاكاة الخوارزمية على نظام سيارة وبناءً على الخطوات السابقة يكون التنفيذ التالي:

- 1) اضبط الحالة الأولية لحلول الخوارزمية على الحالة الحالية للسيارة.
- 2) قم بتشغيل محسن الحلول، والذي يقوم بإرجاع متجه لمدخلات التحكم في كل خطوة زمنية مما يقلل من دالة التكلفة.
- 3) قم بتطبيق إشارات التحكم أو التشغيل الخاصة بالخطوة الزمنية الأولى على السيارة وتجاهل بقية مدخلات التحكم.
- 4) كرر العملية من الخطوة الأولى لكل خطوة زمنية.

لنتعمق أكثر في خطوات الخوارزمية بناءً على مثال نظام السيارة.

1) تمثيل حالة فضاء السيارة ونموذج تغيراتها:

نظراً لأن الخوارزمية هي مشكلة تحسين مقيدة في كل خطوة زمنية، فإن وجود نموذج ديناميكي جيد للمركبة أمر مهم للغاية، ولكن نظراً لأنه يجب أن نقوم بحل مشكلة التحسين في كل خطوة زمنية لا يمكن أن يكون النموذج معقداً للغاية بسبب التحديات الحسابية المرتبطة به، وبالتالي هناك مفاضلة بين دقة النموذج وسرعة الحساب، وبالنسبة للمحاكاة التي نقوم بها سنفترض أن النموذج المستخدم هو النموذج الحركي الأساسي للمركبة؛ وهو فضاء الحالة القائم على النموذج الحركي مع متجه الحالة المحدد على أنه:

$$s = [x, y, \psi, v] \text{، حيث أن: } x, y: \text{ إحداثيات موقع السيارة، } \psi: \text{ زاوية دوران السيارة، } v: \text{ سرعة السيارة.}$$

• مشغلات السيارة:

إن إشارة التشغيل هي عبارة عن متجه $[a, \delta]$ حيث a هي دواصة الوقود التي تتحكم في التسارع (حيث أن القيم السالبة منها تعني ضغط المكابح) و δ هي زاوية التوجيه للسيارة (أي تمثل مقود السيارة)، ويتم حساب هذين المعاملين بواسطة محلل الخوارزمية، وتكون إشارة التشغيل ضمن المجالين:

$$[a, \delta] \in [-\pi/8, \pi/8], [-1, 1]$$

• معادلات تحديث الحالة:

وهي معادلات حركية أساسية للحركة تستخدم لوضع قيود على مشكلة التحسين بحيث يأخذ المحسن ديناميكيات السيارة في الاعتبار، وتعتبر معادلات فرق الوقت المنفصلة من الدرجة الأولى، ويتم استخدام نموذج الديناميكيات التالي لحساب الحالة التالية بالنظر إلى الحالة الحالية:

$$x' = x + v \cdot \cos(\psi) \cdot dt$$

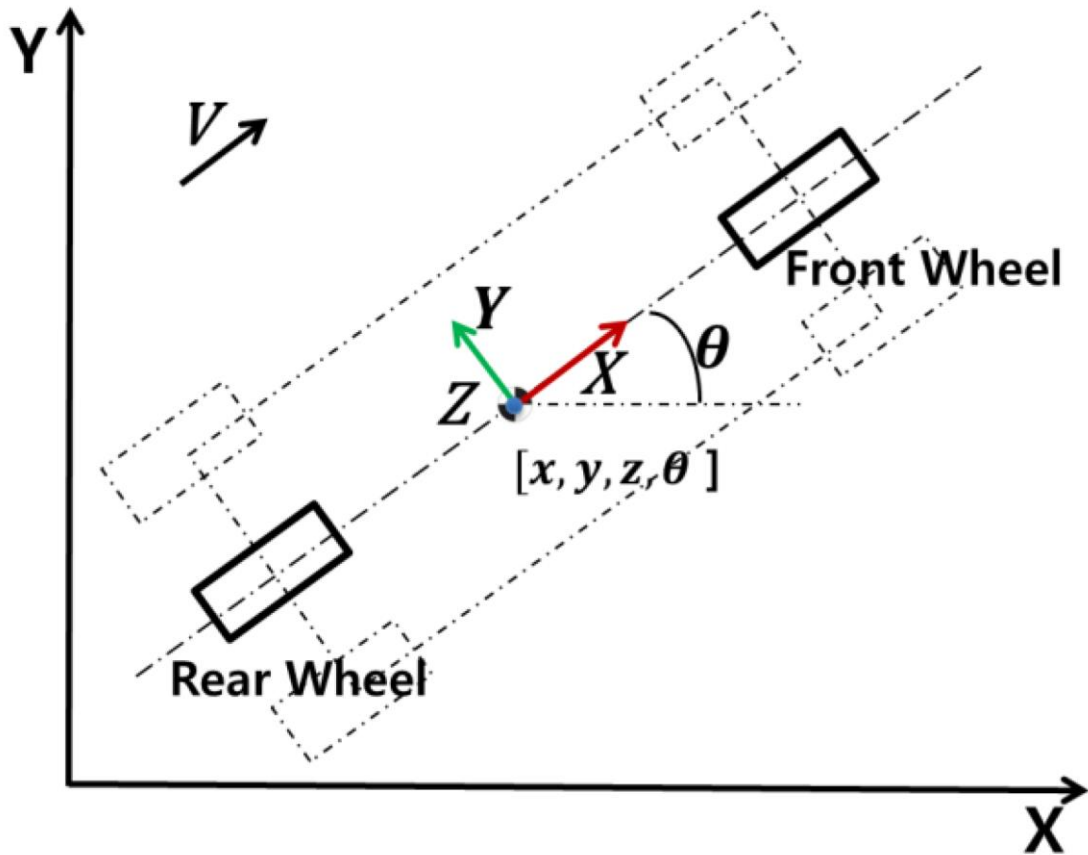
$$y' = y + v \cdot \sin(\psi) \cdot dt$$

$$v' = v + a \cdot dt$$

$$\psi' = \psi + (v/L_f) \cdot \delta \cdot dt$$

ملاحظة: محسنات الحلول هي عبارة عن توابع تعمل عمل المرشحات مثل محسنات التصغير أو التكبير أو التقريب أو ملاءمة الحدود وما إلى ذلك، ومنها محلل IPOpt اختصاراً لمحسن النقطة الداخلية (Interior Point OPTimizer) والذي يمكنه التعامل مع القيود الغير خطية لمثل هذه الأعمال، في حين أن المحللات الأخرى قد لا تتمكن من ذلك، وفي مثل هذه الحالات حيث لا يمكن لمحلل الخوارزمية التعامل مع معادلات القيود الغير خطية والتي من الممكن أن تتغير مع كل خطوة زمنية يمكن أن تكون خطية (باستخدام توسع سلسلة تايلور Tylor's series) وإعادة كتابتها في شكل مصفوفة فضاء الحالة

المتعارف عليها مثل: $s' = As + Bu$ حيث أن: s متجه الحالة، u ناقل التحكم، A مصفوفة الانتقال، B مصفوفة إجراءات التحكم على متجه الحالة، بالإضافة إلى أنه إذا لم تكن الحالة قابلة للملاحظة بشكل كامل فعندئذٍ نستخدم معادلة الملاحظة (Observation): $o = Cs$ باستخدام مصفوفة الملاحظة C ، وهنا لدينا مشكلة وهي أنه لأجل عمل الخوارزمية بشكل فعلي جيداً نحتاج إلى إمكانية ملاحظة الحالات بشكل كامل، وهنا نحتاج إلى مقدرات الحالة الفعلية القائمة على المرشح البايزي (Bayes Filter) مثل مرشح كالمان (Kalman Filter) للحصول على التمثيل الكامل للحالة من ملاحظات الحالة الجزئية (Partial) أو المتغيرة بشكل صاخب (Dynamics).



الشكل (3): آلية توجيه زاوية الموقع للسيارة بناءً على مرشح كالمان

(2) دالة التكلفة:

وهي عنصر مهم جداً للخوارزمية لحساب الخطأ الذي يقوم المحسن بتقليله، وبالتالي يجب أن يكون ضبطها بشكل صحيح بناءً على بيان المشكلة، ومن أنواعها دالة التربيع التي تمثل مجموعاً مرجحاً للمصطلحات التربيعية التالية في كل خطوة زمنية والتي يتم جمعها عبر مجال الزمن المدروس من أجل:

- مربع مسار الخطأ المتقاطع (CTE: Cross Track Error) وهو الفرق بين موضع السيارة والمسار المرجعي.
- خطأ التوجيه التربيعي ψ هو الفرق بين اتجاه السيارة والاتجاه المطلوب ويعرف أيضاً باسم قياس التداخل الإلكتروني على مراحل (EPSI: Electronic Phase-Stepped Interferometry).
- تربيع الفرق بين السرعة الحالية والسرعة المرجعية.
- القيمة التربيعية للمسرّع وزاوية التوجيه (قيود التشغيل).
- القيمة التربيعية لمعدل تغيير المسرّع وزاوية التوجيه (قيود التشغيل).

يتم إعطاء كل من CTE, EPSI أوزاناً كبيرة للتحكم الدقيق، علاوة على ذلك يتم إعطاء معدل تغيير زاوية التوجيه والمسرّع أوزاناً كبيرة لأجل تحقيق مسار توجيه سلس، ويتم تعيين الموضع المرجعي المستخدم في حساب CTE كصفر (للمقابلة لمنتصف المسار)، ويتم أيضاً تعيين الاتجاه المرجعي المستخدم في حساب EPSI كصفر (بحيث يجب أن تكون السيارة متجهة للأمام)، ويتم ضبط السرعة المرجعية بشكل يدوي، ويتم تمثيل المجال الأفقي لزمن المسار على أنه N ، ومن ثم يتم ضرب شروط الخطأ بأوزان مختارة بعناية، ويعد الضبط الصحيح للأوزان بعملية الانتشار الخلفي أمراً بالغاً في الأهمية لأجل تحقيق قيادة سريعة وسلسة، ومن أجل تسريع عملية التحسين فإن القيم الأولية للتشغيل المستخدمة بواسطة المحلل هي نفس نفس أحدث مجموعة من إشارات التشغيل المطبقة فعلياً على السيارة، ويعتبر هذا النهج أكثر واقعية وأسرع حسابياً من التهيئة العشوائية أو التهيئة الصفرية.

(3) المجال الأفقي لزمن المسار:

إن معاملات التردد dt وطول الوقت N من المعلمات الهامة المستخدمة لضبط الخوارزمية كونهما يحددان معاً المجال الذي سيتم إجراء التحسين عليه.

- تردد dt :

يتم تمثيل المدة الزمنية بين خطوتين زمنيتين لاحقتين على أنهما dt كما ذكرناه سابقاً، ويُشار إلى عكس dt على أنه تردد في معاملات الخوارزمية، وهنا لا بد التنويه إلى أن سرعة استجابة السيارة لتغير المدخلات يكون أبطأ من أن تواكبها من خلال دراسة الخوارزمية وذلك بالنسبة للسيارات الذكية قديمة الطراز، وبالتالي تحاول تصحيح نفسها بشكل مستمر تقريباً، وفي حال تم استبدال مكونات المعالجة

البطيئة بأسرع منها أو تم زيادة معدل dt بحيث تستطيع دارة المعالجة مواكبة المدخلات فإن حركة السيارة ستكون أكثر سلاسة ويتم تعليم هذه الأرقام من خلال ضبط الأوزان والتجربة المتكررة.

- طول الخطوات الزمنية N :

يحدد هذا المعامل عدد الخطوات الزمنية التي تخطط وحدة التحكم للخوارزمية، وإن سلبية كون هذا المعامل كبيراً هو أنه يتطلب الكثير من العمليات الحسابية والتي من الممكن أن تؤدي إلى التقليل من موثوقية النظام حيث قد لا يتمكن المحلل من توفير الحل في الزمن الحقيقي، علاوة على أن أي تنبؤات خاطئة قد تؤدي إلى تدهور الدقة في التحكم، ولكن من ناحية أخرى من أجل تطوير سياسة تحكم مثالية من المهم التحسين على مدى فترة زمنية أطول من أجل حساب تأثير التشغيل الحالي على حالات السيارة المستقبلية بشكل صحيح، علاوة على ذلك كلما زادت السرعة المرغوبة للسيارة كلما كان أفق التوقع أطول من أجل الحصول على أفضل إجراء للتحكم والاستقرار، وبالتالي هناك موازنة بين دقة التنبؤ والحوسبة الكبيرة، ولأجل تحقيق أفضل قيمة نقوم بضبط هذا المعامل بعد الحصول على أفضل معدل زمني dt .

(4) ملائمة المسار متعدد الحدود لنقاط مخطط المسار:

تقوم وحدة مخطط المسار بإنشاء إحداثيات مرجعية (x,y) يتم إرسالها إلى وحدة التحكم في السيارة، وتوجد هذه الإحداثيات في مساحة الخريطة ولذلك يتم تحويلها أولاً إلى نظام التنسيق للمركبة، ومن ثم يتم استخدام كثير الحدود من الدرجة الثالثة لملاءمة نقاط المسار هذه (أي مكعب)، ثم يتم استخدام كثير الحدود هذا لوصف المسار المرجعي وبالتالي نقوم بحساب خطأ المسار المتقاطع CTE في كل خطوة زمنية لإجراء التحسين، وللحصول على أفضل أداء يتم تركيب منحني متعدد الحدود على المسار في الزمن الحقيقي.

(5) زمن استجابة المكونات (Hardware):

لحساب تأخيرات المكونات بشكل واقعي نقوم بتطبيق إشارات التحكم في المسرع (دواسة الوقود) على جهاز محاكاة وزاوية التوجيه المرسله أيضاً على السيارة وذلك بمعرفة زمن تأخير المحاكاة، وتعتبر وحدة تحكم MPC أفضل بشكل عام من وحدات التحكم الأخرى في زمن الاستجابة لسببين:

- يمكننا حساب هذه التأخيرات في معادلات تحديث الحالة بشكل صريح قبل تمرير حالة السيارة الحالية إلى المحلل، أي يمكننا إنشاء الحالة الأولية التي يستخدمها المحلل من خلال التنبؤ بحالة المقاسة للأمام في الوقت المناسب باستخدام النموذج الحركي للمركبة وافترض المجموعة السابقة من عمليات التشغيل خلال فترة القياس، وهذا يعني أن إشارات التحكم المثلى التي تم إنشاؤها بواسطة المحلل قد أخذت بالفعل في الاعتبار حالة السيارة الحقيقية عندما يتم تطبيق إشارات التشغيل الفعلية.

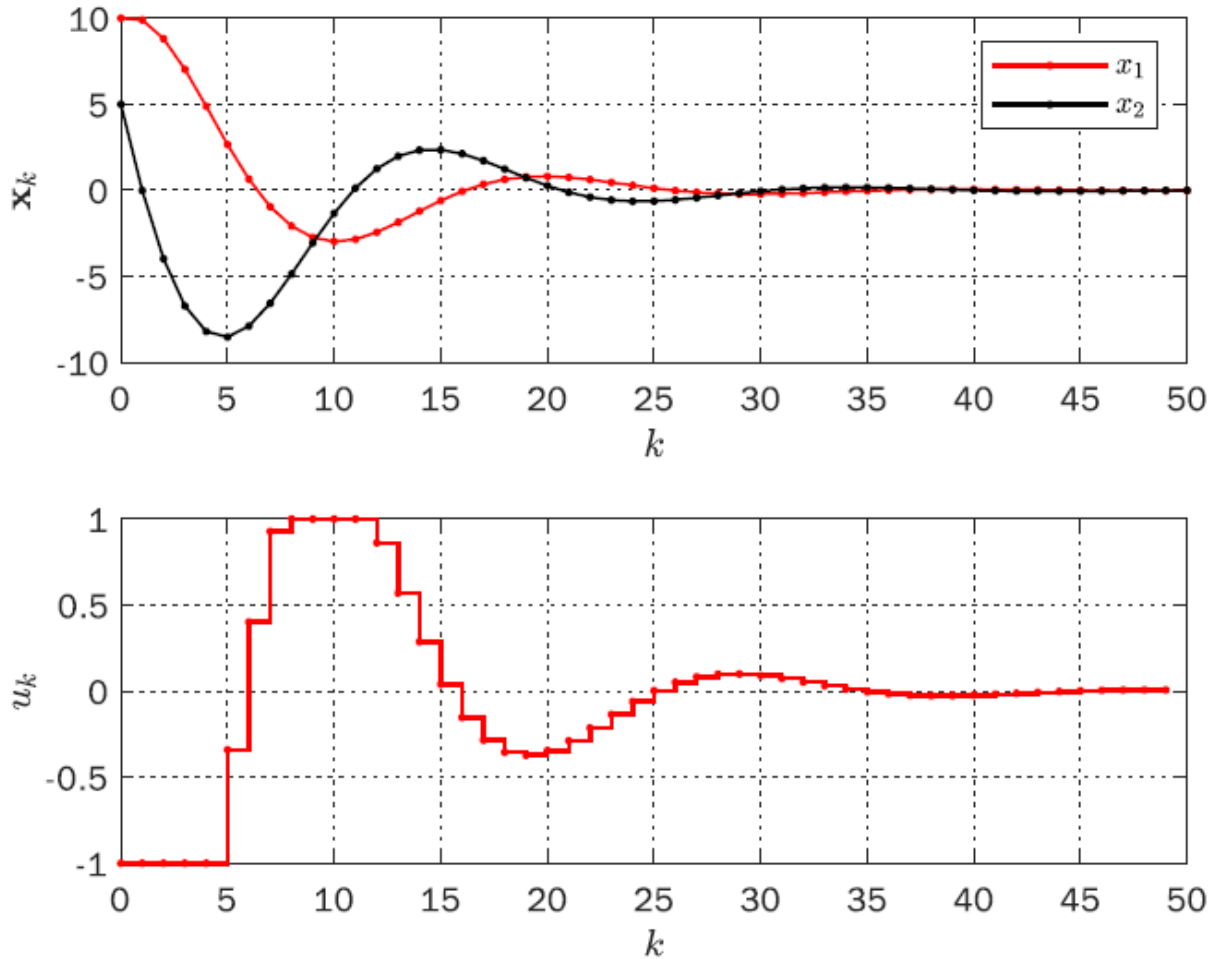
- يمكن تعيين معلمة التردد dt لتكون أكبر قليلاً من زمن الانتقال وبهذه الطريقة ستأخذ معادلات تحديث الحالة وقت الاستجابة في الاعتبار.

وبهاتين الطريقتين يمكن لوحدة التحكم MPC التعامل مع زمن انتقال يصل إلى مئات الملي ثانية، وهو أمر صعب للغاية بالنسبة لوحدات التحكم التقليدية مثل PID, LQR.

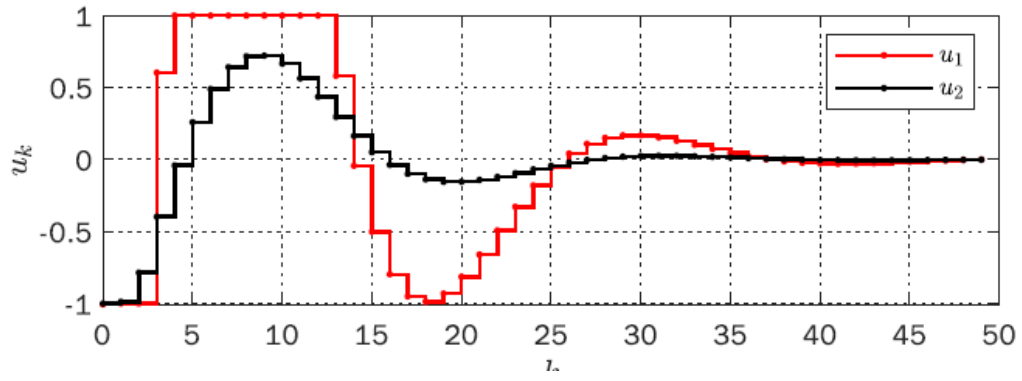
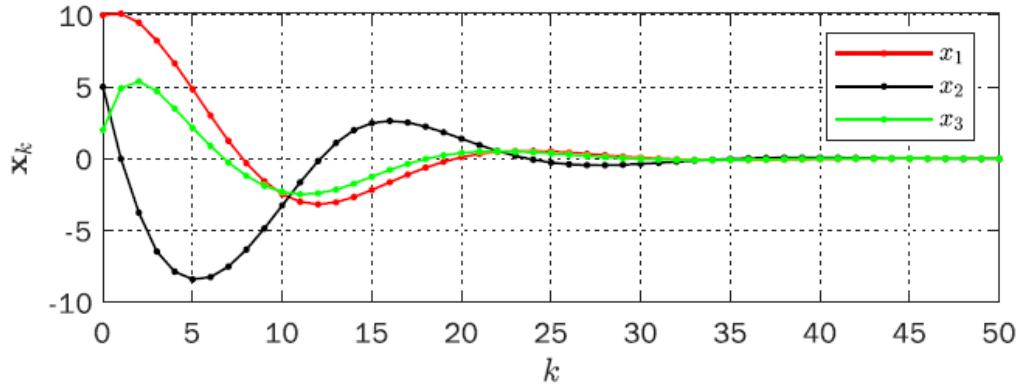
التطبيق:

تم كتابة الخوارزمية على بيئة MATLAB لعدة أنواع لها بنتائج محاكاة كالتالي:

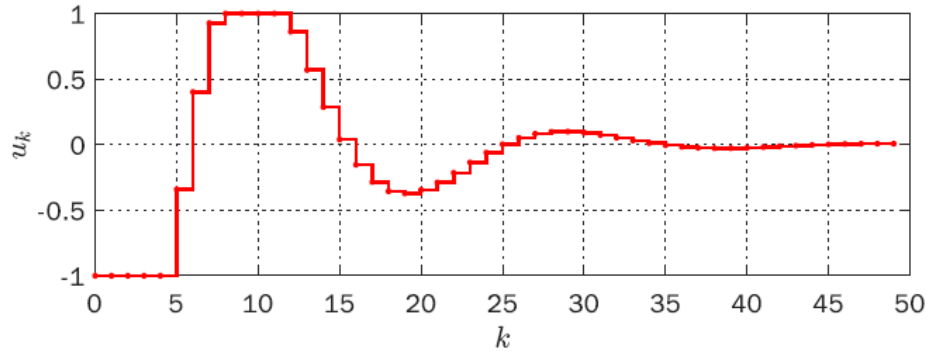
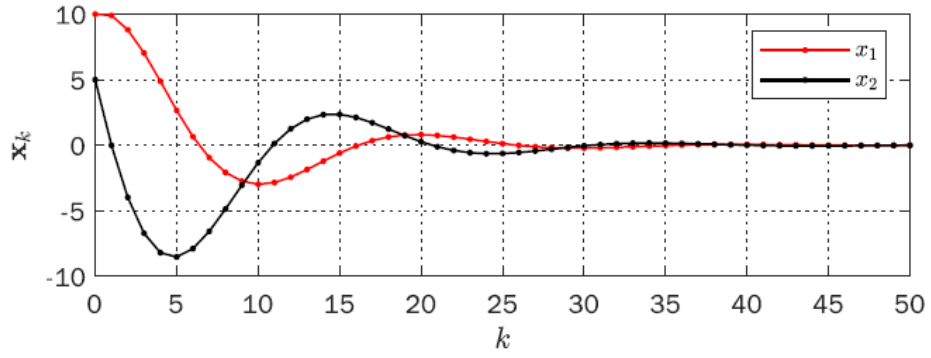
- دخل واحد لنظام تحكم LMPC (Linear Model Prediction Control) خطي:



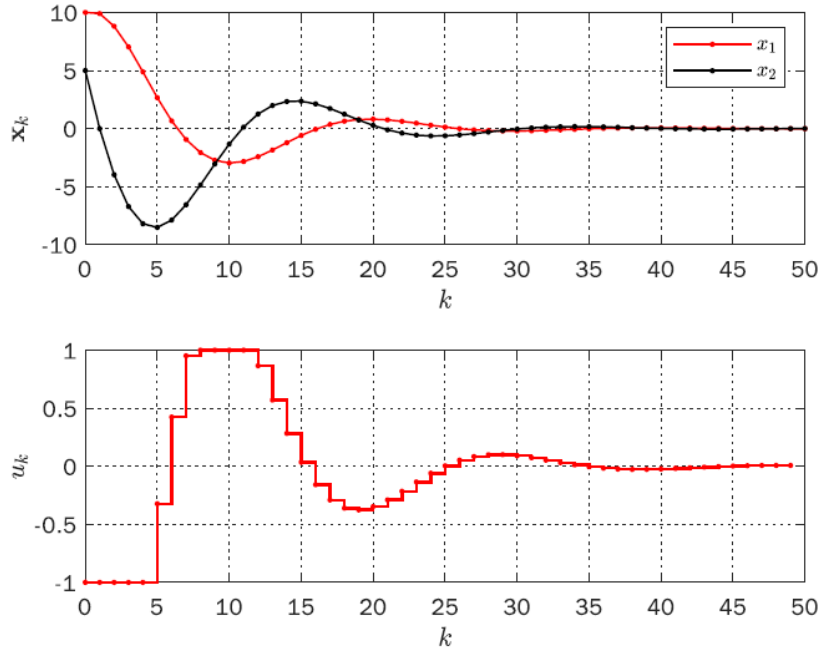
- دخل متعدد لنظام تحكم LMPC:



- دخل واحد مع تخفيض طول الخطوات الزمنية N قليلاً لنظام LMPC:

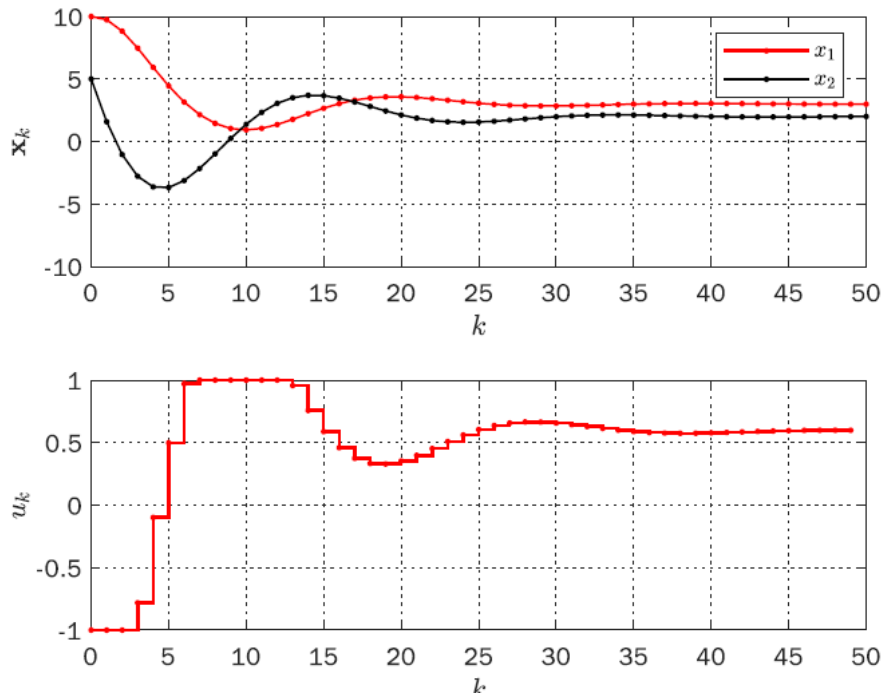


- دخل واحد مع وضع طول جيد للخطوات الزمنية N لنظام LMPC:

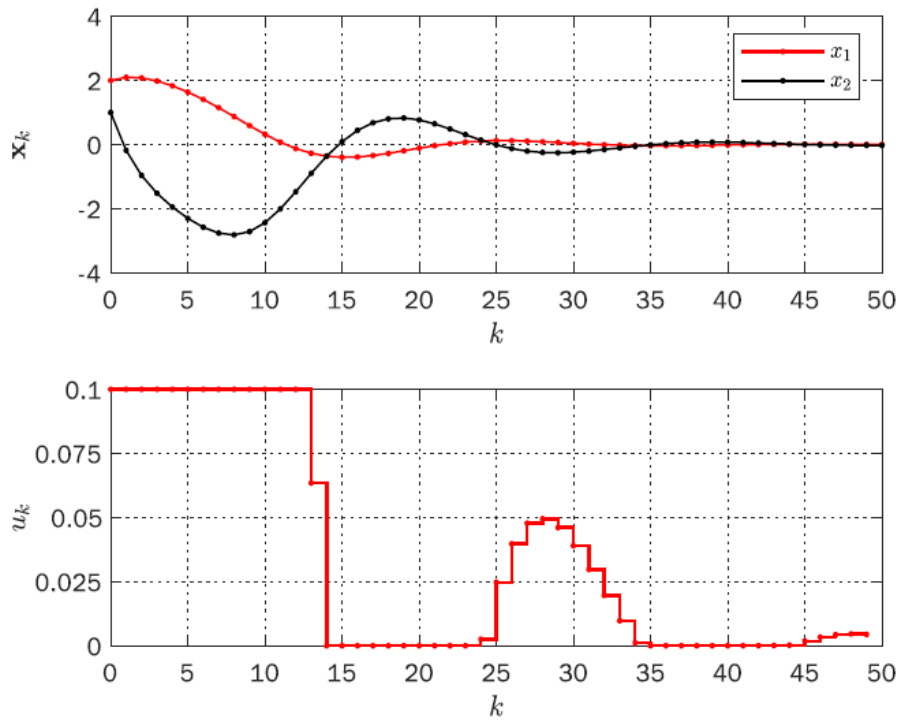


ملاحظة: إن الفرق بين الطريقتين السابقتين ضئيل نوعاً ما كون الخطوات صغيرة نسبياً مقارنةً بالخطوات الزمنية في ميدان التجربة الحقيقية.

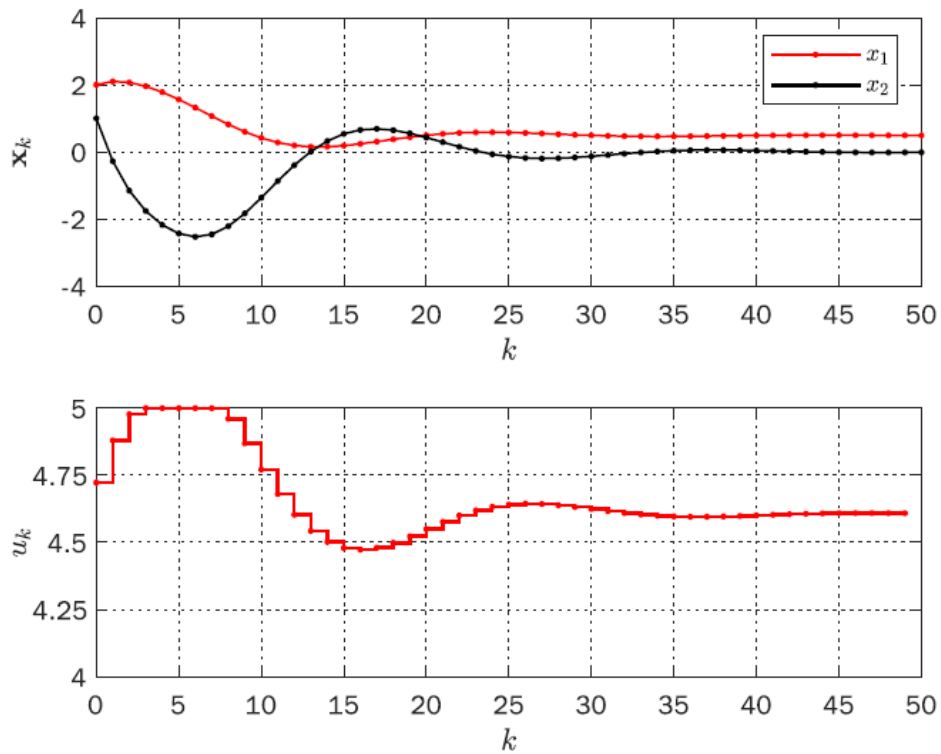
- دخل واحد مع دراسة حالة ابتدائية للنظام $x \neq 0$ لنظام LMPC:



- دخل واحد مع حساب أفضل منحني من الدرجة الثالثة ناتج من الخطأ CTE لنظام تحكم NMPC غير خطي (Non-linear Model Prediction Control):



- دخل واحد مع وضع حالة ابتدائية لا تساوي الصفر لنظام تحكم NMPC:



التوصيات:

بعد الحديث باستفاضة عن نظام التحكم MPC وعرض محاسنها مقابل النظم التقليدية مثل PID, LQR، بالمقابل يجب الحديث عن أبرز مساوئها وهي الحاجة إلى التحسين الكامل في كل خطوة زمنية وهو الأمر الذي يعتبر مكلف حسابياً، وقد تم تطوير عدة منهجيات حسابية للخوارزمية منها:

Adaptive MPC, Robust MPC, Stochastic MPC, Hybrid MPC, Distributed MPC.

وتستخدم هذه الخوارزمية في كل من المعالجات الصناعية والأنظمة الميكانيكية ومحولات الطاقة والأنظمة الشبكية.

المراجع:

<https://github.com/MIDHUNTA30/MPC-MATLAB>

<https://amitp-ai.medium.com/model-predictive-control-mpc-for-autonomous-vehicles-e0fdf75a9661>

https://www.researchgate.net/publication/328003530_The_State-of-the-art_of_Model_Predictive_Control_in_Recent_Years

<https://en.wikipedia.org/wiki/IPOPT>