



مُحاكاة حاسوبية لشبكة المواصلات

مشروع مادة الحقائق الافتراضية



كلية الهندسة المعلوماتية - السنة الرابعة - اختصاص الذكاء الصناعي

أعضاء الفريق:

آلاء عاجي - أسامه الحلبي - عدنان القطان - محمد النصيرات

تهديد:

عانى الإنسان من مشاكل النقل حتى قبل ظهور السيارات، ومع ذلك في السنوات القليلة الماضية أصبح الازدحام المروري حاداً في المدن حول العالم: الكثير من المركبات على عدد قليل جداً من الطرق! فالاختناقات المرورية والطرق المزدحمة أصبحت مشكلة يومية، الأمر الذي جلب المزيد من الاهتمام حول الصحة والبيئة والأمان.

يتم تطوير الكثير من النظريات والنماذج لحركة المرور للاستجابة على أسئلة الباحثين وصناع القرار: ما الذي يسبب الازدحام المروري؟، ما توقيت وموقع انهيار حركة المرور؟!، كيف يتم انتقال الاختناق المروري عبر شبكة المواصلات؟...، والتي تعتبر أساسية من أجل تخطيط فعال لتدفق حركة المرور وتصميم شبكة المواصلات. وإن هذه النظريات تستند إلى دراسات ورقية أو آراء المختصين.

تعتبر المحاكاة الحاسوبية من أهم الأدوات في عصرنا الحالي لأنها تعكس الأحداث بواقعية بشكل شبه كامل بالإضافة إلى أنها توفر إمكانية اختبار العديد من النماذج والحلول قبل البدء بتنفيذها على أرض الواقع، الأمر الذي يخفف من مخاطر فشل المشروع أو زيادة الكلفة المادية بدون فائدة.

محاكاة حركة المرور:

بشكل عام تعرف المحاكاة على أنها تمثيل ديناميكي لجزء من الواقع من خلال نموذج حاسوبي ومن ثم ادخال عامل الزمن.

بدأ استخدام المحاكاة الحاسوبية في تمثيل حركة المرور لأول مرة عام 1995 في جامعة كاليفورنيا، مدينة لوس أنجيلوس عندما نشرت ورقة البحث:

"Simulation of freeway traffic on a general-purpose discrete variable computer"

[Daniel L. Gerlough]

يمكن تصنيف أساليب نمذجة حركة المرور بعدة طرق... احدها يعتمد على طريقة توصيف الواقع الافتراضي. فتم تصنيف أساليب النمذجة إلى ثلاث تصنيفات رئيسية في هذا الإطار:

Macroscopic models: هي تلك النماذج التي توصف حركة النقل بالقياس مع حركة السوائل أي من خلال العلاقة الحتمية بين التدفق والسرعة والكثافة في طرق المواصلات. المحاكاة في هذه النماذج تكون على اساس كل قسم على حدة بدلاً من تتبع حركة كل آلية منفردة.

يعتبر هذا النموذج مهماً في الحالات التالية:

- عندما لا نهتم بتأثير الأفعال التي يصعب نمذجتها بهذا الأسلوب (تغير الممر، وجود عدة أنواع للمركبات...).
- إذا كانت المحاكاة في الوقت الحقيقي، ولكن بسبب التطور في القدرة الحاسوبية للمعالجات أصبحت هذه الحالة أقل اهتماماً.

Microscopic models: في هذه النوع من النماذج يتم توصيف كيف يتفاعل السائق مع الوسط المحيط (تسارع، كبح السرعة، تغيير الممر،...) من خلال نماذج ملاحقة السيارة (car-following models) والأوتومات الخلوي (cellular automata).

يعتبر هذه النموذج ملائماً في الحالات التالية:

- عندما نريد نمذجة كيف تؤثر مركبة وحيدة على حركة النقل.
- عندما نريد وصف سلوك القيادة البشرية التي تتضمن أخطاء التقدير وأوقات رد الفعل، الغفلة والترقب.
- تصوير التفاعلات بين المشاركين المختلفين في حركة المرور (السيارات والشاحنات والحافلات وراكبي الدراجات والمشاة، وما إلى ذلك).

Mesososcopic models: وهو نموذج هجين يجمع بين النموذجين السابقين.

هناك العديد من برامج المحاكاة الحاسوبية منها التجاري (المدفوع) والآخر المجاني والتي يمكن استخدامها للبحث الأكاديمي أو من قبل صناع القرار من أجل تحليل مشاكل النقل. وبما أن هذه البرمجيات مبنية على افتراضات ونظريات مختلفة متعلقة بنمذجة حركة المرور، لكل منها مساوئ وميزات. نذكر منها:

SUMO – Simulation of Urban Mobility - 1

وهي برمجية مجانية مفتوحة المصدر من النموذج المايكروسكوبي تم تطويرها في معهد أنظمة النقل الموجود في مركز ألمانيا لأبحاث الفضاء، تتضمن حزمة كبيرة لمحاكاة الشبكات الطرقية الضخمة يتم التعامل معها إما يدوياً عن طريق كتابة الكود البرمجي الخاص بملف XML، أو عن طريق استيراد نماذج لشبكات تم تصميمها في تطبيقات أخرى أو من الممكن استخدام المولدات التلقائية المضمنة ضمن التطبيق مثل (مولد شبكة - مولد مركبة - مولد عشوائي). إيجابياتها:

- (1) القدرة على محاكاة شبكات طرقية ضخمة جداً
- (2) القدرة على استخدام مركبات التنقل العام (قطار - باص).
- (3) القدرة على توجيه المركبات والتحكم بالطرق المتاحة (إغلاق طريق معين أثناء مرور مركبة معينة فيه).

سليبياتها:

- (1) عدم دعمها لانظمة الوحدة المختلفة (من $m.s.$ إلى $Km.h.$ فقط)
- (2) لا يوجد أي نماذج مستخدمة لمحاكاة الإشارات المرورية، بل يجب القيام بها يدوياً في ملفات الXML.
- (3) لا تدعم عملية الاحتفاظ بالمحاكاة (مثل الطباعة أو تسجيل فيديو).

Quadstone Paramics Modeller -2

يعتبر منصة ذكية ومتطورة لنمذجة الشبكات الطرقية والمركبات بالإضافة إلى عمليات النقل، تأسس هذا المشروع في أوائل التسعينات من قبل وزارة النقل للمملكة المتحدة ثم تم تطويره في مركز الحوسبة المتوازية الموجود في جامعة إدنبرة، ثم تم الاستحواذ على هذه المنصة من قبل Portrait Software عام 2005م، تعتبر هذه المنصة من النموذج المايكروسكوبي وهي تمتلك الكثير من الوسائل المساعدة والتي تسهل على المستخدم التعامل مع التطبيق مثل (مولد الشبكات التلقائي) ومن ثم تمكن المستخدم من التعديل عليها كما يريد، بالإضافة إلى القدرة على التعديل على البيئة خلال الـ Run Time.

تم تطوير المنصة من الصفر بالاعتماد على عدة نماذج وبشكل رئيس على ورقة البحث "A model for traffic simulation" للباحث هانز توماس فريتش إيجابياتها:

- 1) يدعم العديد من أنظمة الوحدات (أنظمة القياس مثل *US – UK – Metric System*).
- 2) تمتلك مكتبة ضخمة لأنواع المركبات الممكن استخدامها مع إمكانية للتلاعب ببعض المتغيرات المتعلقة بها مثل السرعة والحجم والوزن وما إلى هنالك.
- 3) تسجيل عملية المحاكاة على شكل فيديو.

أبرز سلبياتها أنها تستهلك عملية المحاكاة حوالي 50% من CPU وقد تصل في بعض الأحيان إلى 100%.

CORSIM – CORidor SIMulation -3

عبارة عن مجموعة من البرمجيات التي تستخدم من قبل مهندسي الطرقات، مساعدة جداً في محاكاة الشبكات الطرقية المراد تطبيقها على أرض الواقع. وهو أيضاً تطبيق من النموذج المايكروسكوبي تم تطويره في جامعة فلوريدا، يتيح القدرة على الاطلاع على نماذج الشبكات الطرقية والاستفادة منها حيث يتيح إمكانيات التعديل على بعض المتغيرات التي تتحكم بالمحاكاة قيد التشغيل، كما وتشمل هذه المحاكاة على العديد من الخيارات من حيث المركبات وعمليات التحريك الممكن استخدامها.

إيجابياتها:

- 1) توفير محاكاة للمشاة (حركة المشاة على الرصيف و ممر المشاة).
- 2) إمكانية تحويل المحاكاة المنجزة فيها إلى صيغ تدعم منصات محاكاة أخرى.
- 3) تدعم أنواع متعددة من السائقين (مستخدمي اليد اليسرى مثلاً أو في المركبات التي يكون فيها كرسي السائق في الجهة اليمينية من المركبة).

سلبياتها:

- 1) لا توفر أمثلة جاهزة لعملية المحاكاة .
- 2) لاتدعم أنواع المركبات ذات الحجم الكبير مثل (قطار - باص) وإنما السيارات ذات الحجم العادي فقط.
- 3) تستهلك عملية المحاكاة حوالي 50% من CPU، والتي تعد كبيرة مقارنة بـ SUMO التي تستهلك 2% فقط.

-4 Mycosm traffic flow simulation

عبارة عن مشروع برمجي تم تنجيزه باستخدام 3DMax واعتماد لغة python , تقوم هذه البيئة بتوضيح الحركة الديناميكية لحركة المرور والتحكم بها بشكل كامل من خلال نص برمجي (Script) يُكتب بذات اللغة , فمثلاً: عند تشغيل البيئة , يضيف نص Python سيارات في نقاط بداية مختلفة حول المدينة. يمكن زيادة أو تقليل العدد الإجمالي للسيارات في البيئة بضغطة زر. تراقب كل سيارة طريقها للأمام , وتتجنب أمام السيارات أو العوائق أمامها. تتباطأ المركبات وتتوقف عندما يتحول لون إشارة المرور أمامك إلى اللون الأحمر , وتنطلق وتتسارع عندما يتحول الضوء إلى اللون الأخضر.

من أبرز ايجابياتها أنها ذات رسومات عالية المستوى والتحكم بها سهل وممتع, بالإضافة إلى حركة المركبات السلسة جداً وخصوصاً عند الانعطافات أو الاختناقات المرورية. سلبياتها: لا تتضمن أنواع متعددة من المركبات ولا تتيح التحكم بمركبة معينة.

رأي الفريق بعد المقارنة بين البرمجيات السابق ذكرها:

وجدنا أن Quadstone Paramics Modeller هو الأفضل من حيث الرسومات وسهولة الاستخدام بالإضافة لامتلاكه مكتبات ضخمة للنماذج والقوالب والعديد من التقنيات التي تجعل من المستخدم متحكماً بشكل كامل بالمحاكاة التي يعمل عليها والتي تجعل من المحاكاة أقرب ما يمكن إلى الواقع , بالإضافة إلى SUMO لقدرتها على استيعاب عمليات المحاكاة كبيرة الحجم.

. المشكلة المطروحة:

لدينا مجموعة طرقات متداخلة فيما بينها (شبكة طرقية)، وليكن لدينا النقطتين A و B المسافة بينهما L ويوجد على هذا الطريق n سيارة تسير بشكل مستمر فوقه. لدينا سيارة معينة نتحكم بها (نحدد لها المسار) نريد ايصالها إلى نهاية هذه الطريق انطلاقاً من بدايته، بحيث تصل لغايتها بالمرور من الطريق الأمثل، متجنباً للحوادث والاختناقات المرورية. نحتاج إلى بناء برمجية قادرة على محاكاة حركة النقل خلال هذه الشبكة

. مكونات المحاكاة:

- 1- شبكة تنقل ممتدة على مساحة فيزيائية واسعة.
- 2- عدد كبير من المركبات الفعالة (إما بشكل تلقائي أو مُتحكم بها من قبل مستخدم).
- 3- أنماط مختلفة من المركبات المستعملة (سيارة - باص - شاحنة).
- 4- محاولات تمكن المستخدم من التحكم بالمركبة التي يريدتها (مثل: السرعة، الوزن، الحجم)
- بالإضافة إلى إمكانية التحكم بالبيئة (مثل: عدد المركبات، عدد الطرق، الطريق سالك أم لا).
- 5- قيم ونسب صحيحة وأقرب ما يمكن إلى الواقع (مثلاً: حجم السيارة متناسب مع وزنها وما إلى هنالك).
- 6- تحقيق التفاعل بين نظام المواصلات المنشأ (مركبات وطرق وما إلى هنالك) والمستخدم.

. القيود:

- 1- المسارات أقرب ما يمكن إلى الواقع (من حيث الشكل وديناميكية العمل).
- 2- على المركبات البقاء ضمن مسارها (الحفاظ على مسار المركبة قد الإمكان).
- 3- على كل مركبة تحقيق مسافة أمان بينها وبين المركبات الأخرى.
- 4- تغيير السرعة عند الضرورة (التسارع والتباطؤ).

. نقاط مهمة يجب أخذها بعين الاعتبار:

- 1- الأداء الأمثل للمحاكاة.
- 2- شبكة طرقية كثيفة (تحمّل أكبر قدر ممكن من المركبات والطرق).
- 3- حركة النظام المروري أقرب ما يمكن إلى الواقع.
- 4- قدرة النظام المروري على الحفاظ على حركة مرور سليمة بشكل كامل.
- 5- تمكين خاصية الوقت لحقيقي.
- 6- تمكين الخواص الفيزيائية للمركبات.
- 7- تمكين قدرة التحكم بالمتغيرات المتعلقة بالمركبة والطريق على حد سواء.

. الخطوات العملية الأساسية:

. خطة عمل أولية [منهجية العمل]:

في المقام الأول، يتم إجراء دراسة لمعاملات المرور المطلوبة (دمج طرق - تفرع طريق - منعطف .. الخ) بعد ذلك يجب معرفة المعاملات الأولية لعملية مراقبة سير النظام الطرقي المراد بناءه (معرفة أنواع المركبات المراد استخدامها وخصائص كل منها ومعرفة كيفية سير عملية التحكم فيها "السرعة والوزن وما إلى هنالك").

ثانياً، يتم انشاء بيئة الشبكة الطرقية الأولية المراد تجريب ما سبق عليها للتأكد من تمام عملها، ثم تنتقل إلى تمكين هذه البيئة (أي خلق الشبكة الطرقية الصحيحة والمتكاملة التي نريد تنفيذ محاكاتها عليها).

ثالثاً، تحقيق الخوارزميات والمعادلات الرياضية اللازمة لضمان حركة سلسلة في المحاكاة المُعدة (والتي سيرد ذكرها لاحقاً).

رابعاً، دراسة المواقف المختلفة التي قد تقع فيها المركبة (ازدحام - اصطدام - اغلاق طريق - الخروج عن الطريق - التعامل مع إشارة المرور).

خامساً وأخيراً، إتاحة امكانية التحكم بمركبة معينة من خلال إتاحة نافذة للمستخدم تتضمن المتغيرات اللازمة لهذه العملية (نقطة البداية و النهاية - السرعة .. الخ).

أهم الخوارزميات اللازمة للقيام بعملية محاكاة سلسة:

1- THE FLUID DYNAMIC ALGORITHMS:

العلاقة الرياضية لهذه الخوارزمية عند اسقاطها على شبكة الطرقات تكون:

$$traffic\ flow = traffic\ Density \times mean\ velocity \dots (1)$$

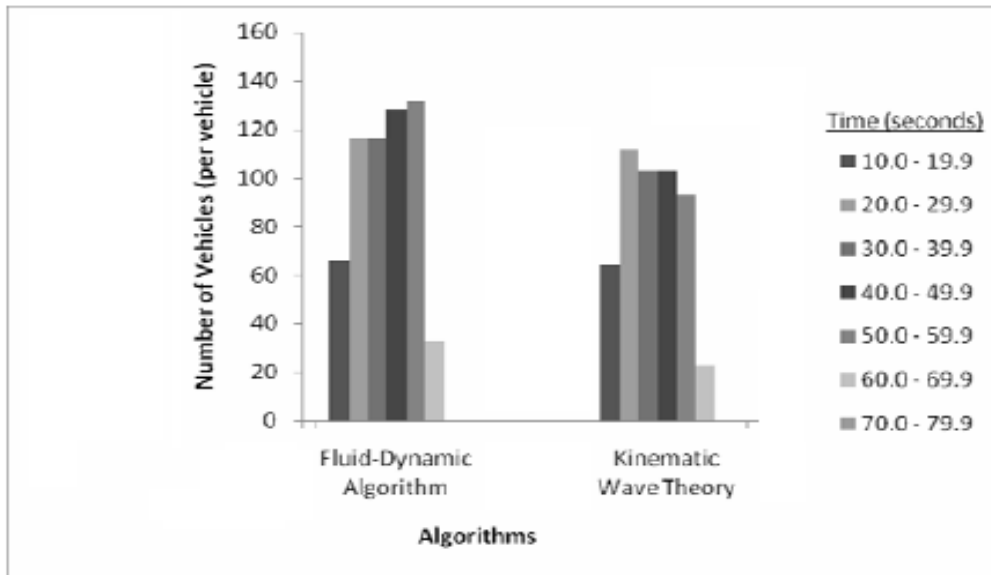
حيث يمثل تدفق حركة المرور متوسط عدد المركبات المارة في كل وحدة زمنية، وتمثل كثافة حركة المرور عدد المركبات في كل وحدة مسافة. يمثل متوسط السرعة متوسط سرعة السيارات في وحدة المسافة. إذا وصلت السرعة إلى قيمتها القصوى ، فهذا يعني أنه لا توجد سيارات أخرى على الطريق السريع وأن السيارة قادرة على التحرك بأعلى سرعة. تشير قيمة السرعة 0 إلى أن السيارة ليست في حالة تحرك أو بعبارة أخرى ، فهي عبارة عن واقعي من الصدمات.

2- THE KINEMATIC WAVE THEORY:

تحليل حركة تدفق المياه في الأنهار يتشابه شبيهاً كبيراً مع عملية التدفق المروري في الشوارع، تقوم هذه الخوارزمية بوصف الخصائص الحركية لعملية تدفق المركبات بناءً على نظرية الموجة الحركية، حيث اقترح (Wen-Long Jin) نظرية الموجة الحركية لحركة مرور المركبات المتغيرة حيث تشترك الممرات المختلفة في نفس ظروف حركة المرور.

تتعلق المتغيرات المتحكممة بتواتر الحركة في هذه الممرات بالعديد من العوامل (منها: دمج الطرق - تباين سرعة المركبات)، وبناءً على ذلك تم تصميم ديناميكيات حركة المرور المتغيرة على أساس نظريات الموجة الحركية على النحو التالي:

$$(p + V(1 + e)) = 0 \dots (2)$$



Travel Time for Each Algorithms in 60 minutes

-3 THE INTEGRATED ACC CAR-FOLLOWING MODEL

تصف العمليات المتتالية واحدة تلو الأخرى للمركبات على نفس المسار في تدفق حركة المرور، تعبر هذه الخوارزمية عن حالة حركة السيارة والعملية التدريجية للتباطؤ في كبح المركبات.

تظهر نتائج المحاكاة التجريبية تفوق النموذج الجديد على النماذج الأخرى في المحاكاة التي تشكل نماذج الشوارع الحقيقية. يحقق نتائج جيدة في وقت الانتظار وقت الانتقال (النقل بين نقطتين معينتين) وتغيير المسار وسرعة الأمان.

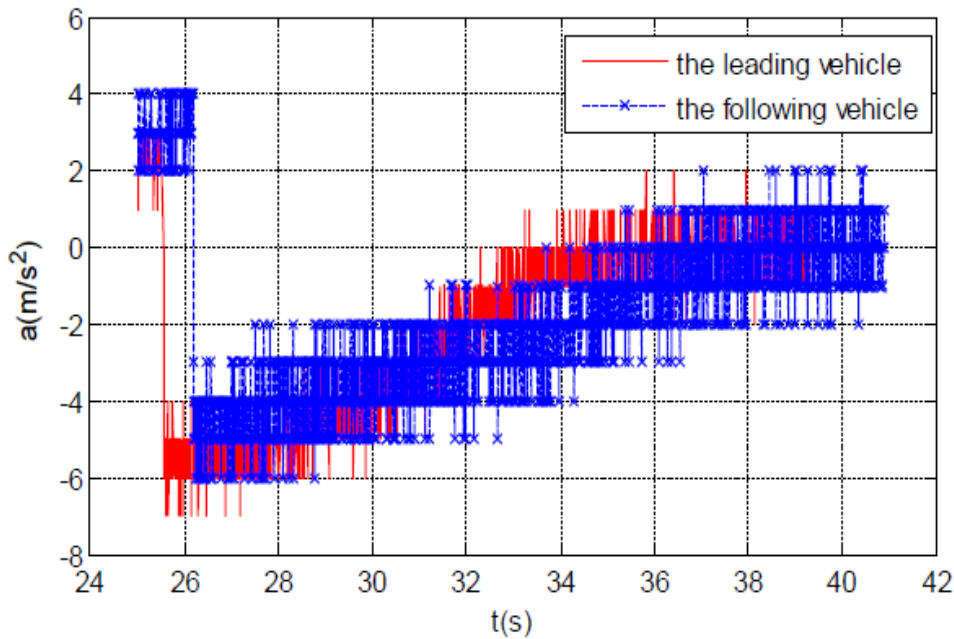
هذه الخوارزمية موجودة ضمن منصة SUMO من خلال نموذج "KRAUSS"

KRAUSS MODEL: هو نموذج microscopic ، متواصل في الفضاء ، يتحكم بالمركبة بناءً على السرعة الآمنة في عام 1997. يتم حساب هذه السرعة الآمنة على النحو التالي:

$$v_{safe} = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)t_r}{\frac{v_l(t) + v_f(t)}{2b} + t_r}$$

ولكن من الممكن أن تكون قيمة هذه السرعة أكبر بكثير من السرعة القصوى المسموح بها على الطريق أو تفوق قدرة المركبة على الوصول للمرحلة التالية، فلذلك يتم حساب الحد الأدنى من هذه القيم على أنها السرعة الناتجة والتي تسمى السرعة "المريغوية" كما يلي:

$$v_{des} = \min[v_{max}, v + at, v_{safe}]$$



The curve of deceleration in original Krauss model

آلية تمثيل الشبكة الطرقية:

قمنا باستخدام بعض الأدوات المساعدة "أنظمة" في تمثيل بنية الشبكة الطرقية (الشوارع - إشارات المرور - المسارات) سيتم ذكرها تالياً مع شرح مبسط عن خطوات العمل العامة:

1. Urban Traffic System pro

2. Traffic and Roads System

- حيث استعنا بالنظام الأول في بناء شبكة المواصلات بما فيها من شوارع وإشارات مرور (بناء نظام محاكاة طُرقي)، وأما الثاني فقد قمنا بدراسة الآلية المتبعة بتمثيل العوامل الفيزيائية المتحكممة بالمركبات مثل مسافة الأمان وطريقة توزيع السيارات على مسار معين.

- من أجل المركبات المستخدمة: تم استخدام بعض السيارات المعدة مسبقاً (Prefabs) والتي يعد من أهم ميزاتها أنها ذات حجم صغير ودقة عالية (حتى نتمكن من إضافة أكبر عدد ممكن من المركبات "حتى الآن تمكنا من إضافة ما يقارب 650 مركبة تعمل بشكل مثالي").

- من أجل الأرضية "المستوي" التي تمت عليها المحاكاة: قمنا بتوزيع الطرقات بحيث تشكل شبكة ذات شكل معين، وقمنا بإضافة بعض الأبنية لتمكين المستخدم من تمييز الأماكن المختلفة في المحاكاة (أشجار - شجرة مركزية في منتصف المحاكاة - أبنية - مقاعد) وسيتم العمل لاحقاً على إضافة بعض الأشخاص.

- من أجل الإضاءة والسماء (البيئة المحيطة): قمنا بإضافة Sky Box معين وقمنا بتمثيل إضاءة مماثلة لضوء الشمس خلال الأيام الاعتيادية.

المراحل التي تم إنجازها:

1. تمثيل شبكة مواصلات طرقية وبناءها "ثلاثية الأبعاد 3D" والتي تشمل (مسارات ذات اتجاه أحادي ومزدوج - ساحات - انعطافات).
2. تحقيق حركة مواصلات (مركبات ذات قيادة ذاتية "آلية").
3. تحقيق نظام مروري (التقاطعات والإشارات المرورية).
4. تمكين المستخدم من التحكم اليدوي بالسيارة (القيادة).
5. تحقيق زوايا مختلفة للرؤية.
6. إمكانية التعديل على سرعة المركبات ومسافة الأمان (مسافة الكبح) بالإضافة إلى كل من التسارع والتباطؤ.
7. إمكانية إعادة توزيع المركبات ضمن المسارات المحددة.
8. تحقيق القدرة على رؤية الخريطة العامة للمحاكاة.
9. تمكين المستخدم من استكشاف بُنية المحاكاة بشكل كامل (حركة حرة متكاملة للكاميرا).
10. التحكم بعدد المركبات (من مركبة واحدة وحتى مايقارب 1000 مركبة).
11. إضافة واجهة تحكم بمجريات المحاكاة.
12. إمكانية تتبع سيارة معينة (مراقبة عملية القيادة الآلية للمركبة عن قرب).
13. إمكانية التعديل على خريطة المحاكاة بشكل مبسط (يتم العمل على تطوير هذه الخاصية حالياً) خلال Run Time.
14. إمكانية إعادة بناء المحاكاة مع ضبط متغيرات معينة (السرعة - مسافة التباعد - عدد السيارات).
15. إمكانية نقل المركبة إلى مكان معين (Drag and Drop) خلال Run Time.
16. إمكانية تغيير أمكنة models المستخدمة (أبنية - أشجار - جسر) خلال Run Time "من الممكن استخدامها كعقبات".
17. عرض المتغيرات الأساسية التي تتحكم بالمحاكاة من خلال نافذة معينة وإمكانية التعديل عليها.
18. إمكانية القيادة اليدوية أي مركبة ضمن المحاكاة.
19. إمكانية القيادة الآلية لسيارة معينة ضمن المحاكاة (من خلال التحكم بمتغيرات التحكم بالسيارة).
20. إمكانية التلاعب بمتغيرات مركبة معينة (اتاحة تجربة عملية التصادم بين مركبتين).
21. العمل على توجيه سيارة (خلق نقطة انطلاق مبدئياً).

الصعوبات التي واجهتنا:

1. تراجع الـ FPS مع زيادة عدد المركبات, مما يؤدي بدوره إلى حركة بطيئة جداً ضمن المحاكاة.
2. عملية كشف التصادم عند المنعطفات, حيث أنه من الممكن أن الشعاع الصادر من مقدمة السيارة قد يواجه صعوبة في اكتشاف المركبة التي تليه مما يؤدي إلى حدوث تصادم طفيف.
3. خروج المركبة عن المسار عند بعض الانعطافات الحادة مما يؤدي إلى خلل في توجيه عجلات السيارة وبالتالي من الممكن حدوث حالة انقلاب.
4. العشوائية في انشاء المركبات في حالة ادخال عدد كبير حيث انه من الممكن أن لايتسع المسار لعدد كبير من السيارات.

حل مشكلة تناقص الـ FPS:

لتلافي مشكلة بطء التحريك عند زيادة عدد السيارات إلى ما يقارب الـ 1000, تمت المعالجة من خلال ربط كل كاميرا بالمسار التي تقوم بعرضها من خلال bitmask, بحيث أنه عند التبديل بين كل زاوية عرض وأخرى يتم فحصها وإيقاف عرض المركبات ضمن المسارات التي لا تظهر ضمن هذه الزاوية من الرؤية مع الحفاظ على سير العمليات الحسابية ضمنها (إيقاف الرسم فقط دون إيقاف المعالجة).

- [1] Martin Treiber and Arne Kesting, "Traffic Flow Dynamics Data, Models and Simulation", Springer Heidelberg, p-56-58, 2013
- [2] Aji Ronaldo and Taufiq Ismail, "Comparison of the two micro-simulation software AIMSUN & SUMO for highway traffic modelling", Linköping University, Sweden, p-(12,18), 2012
- [3] Jason Sewell, "reconstructing traffic flows", University of North Carolina, USA, p-(36-54), 2009
- [4] G. Kotusevski, "A review of traffic simulation", Massey university, Auckland, New Zealand, p-(1-3), 2009
- [5] FHWA office of operation research, CORridor-microscopic SIMulation program, McLean, Virginia, p-(3-9), 2006
- [6] Wikipedia, "Simulation of Urban Mobility", (March 6, 2020), Available at: en.wikipedia.org/wiki/Simulation_of_Urban_MObility [April 4, 2020].
- [7] Wikipedia, "CORSIM", (November 19, 2018), Available at: en.wikipedia.org/wiki/CORSIM [April 4, 2020].
- [8] Wikipedia, "Quadstone Paramics", (November 17, 2016), Available at: en.wikipedia.org/wiki/Quadstone_Paramics [April 4, 2020].
- [9] Wong Poh Lee and Mohd. Azam Osman, "Dynamic Traffic Simulation for Traffic Congestion Problem Using an Enhanced Algorithm", World Academy of Science, Engineering and Technology, p-(2-4), 2008
- [10] Jang, Seung-Ju, "Design of Traffic Flow Simulation System to Minimize Intersection Waiting Time", Department of Computer Engineering, - Dongeui University, Vol.-9 /No.5 , 2018
- [11] Milanés, V., & Shladover, S. E. (2014). Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 48, p. 285–300
- [12] Zhexin Xu, "Research on car-following model based on SUMO", Fujian Normal University, Fuzhou, China, [January 2015], p. 1-10.