

Testing Techniques for Autonomous Vehicles

Αλέξανδρος Γαλαζούλας - 10629
Δημήτρης Αξιμιώτης - 10622



Δομή Παρουσίασης



X-in-the-Loop (XILS)

- Εισαγωγή στο Testing AVs
- X-in-the-Loop Simulation (XILS)
- Μεθοδολογία Αξιολόγησης (XILS)
- Ρύθμιση Πειραμάτων
- Αποτελέσματα XILS



Deep Maneuver (Adversarial)

- Deep Maneuver (Adversarial Testing)
- Αρχιτεκτονική DeepManeuver
- Αποτελέσματα DeepManeuver



Vehicle-In-The-Loop (VILS)

- Vehicle-In-The-Loop-Simulation
- Εφαρμογή VILS περιβάλλοντος
- Μορφή Ελέγχου αυτόνομης οδήγησης
- Εφαρμογή στα πραγματικά σενάρια
- Συμπεράσματα AD-VILS



Digital-Twin & Βιβλιογραφία

- Digital-Twin
- Εφαρμογή Digital-Twin
- Βιβλιογραφία
- Αποτελέσματα των papers

Εισαγωγή στο Testing AVs

Γιατί χρειάζεται testing στα αυτόνομα οχήματα:



Αμέτρητα σενάρια



Σπάνια κρίσιμα οδηγικά γεγονότα



Συμπεριφορά μονάδων AI δύσκολο να προβλεφθεί



Χάσμα μεταξύ προσομοίωσης και πραγματικότητας (sim-to-real gap)



Ανάγκη για επαναληψιμότητα & αξιοπιστία

Δύο βασικές κατηγορίες τεχνικών:



Δοκιμές βασισμένες σε προσομοίωση (X-in-the-Loop)



Adversarial δοκιμές για εντοπισμό ευπαθειών (Deep Maneuver)

X-in-the-Loop Simulation (XILS)

Επίπεδα δοκιμών:



Model-in-the-Loop



Software-in-the-Loop



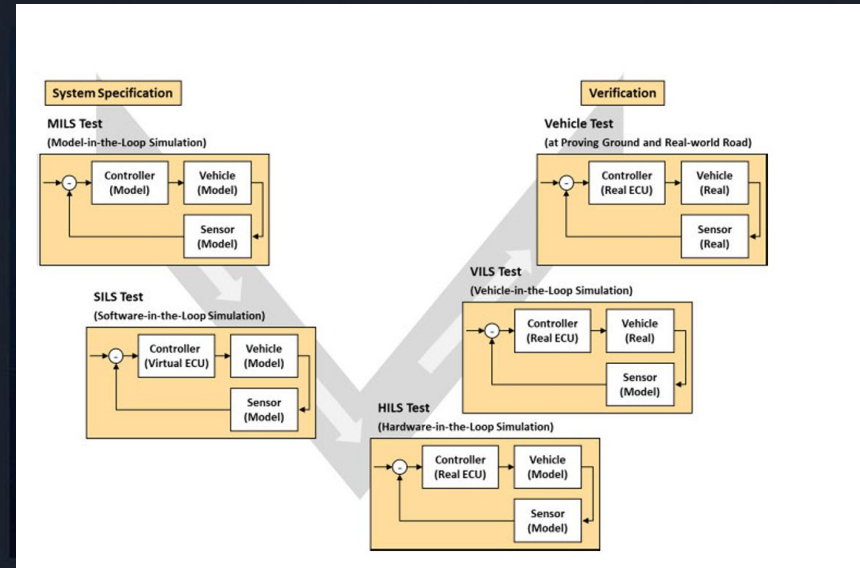
Hardware-in-the-Loop



Vehicle-in-the-Loop

Στόχος μεθόδου:

- Μέτρηση της αξιοπιστίας της προσομοίωσης
- Συγκριτική αξιολόγηση simulation ↔ πραγματικού οχήματος
- Εντοπισμός αποκλίσεων



Εικόνα: Τα τέσσερα επίπεδα X-in-the-Loop δοκιμών.

Μεθοδολογία Αξιολόγησης (XILS)

Τι αξιολογείται:

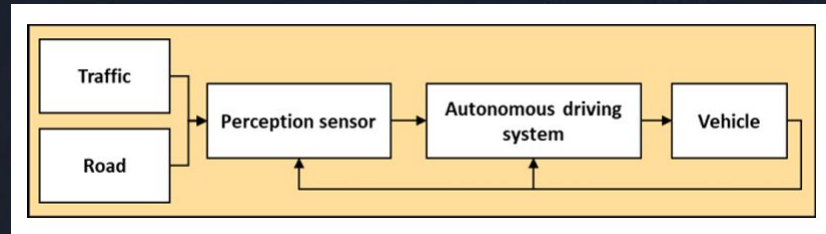
- Διαμήκης και εγκάρσια συμπεριφορά
- Στροφή, απόκλιση, yaw, επιτάχυνση
- Απόσταση ασφαλείας

Μετρικές:

- Δείκτης Συσχέτισης (Correlation Index)
- Δείκτης Επαναληψιμότητας (Applicability Index)

Περιβάλλον δοκιμών:

- Προσομοίωση CarMaker
- Πραγματικές δοκιμές στην πίστα K-City



Εικόνα: Διάγραμμα της μεθοδολογίας αξιολόγησης αξιοπιστίας XILS.

Ρύθμιση Πειραμάτων

Σενάρια δοκιμών:



Cut-in και Cut-out σε ευθεία



Παρακολούθηση πορείας με GPS σε καμπύλη



Παρακολούθηση πορείας βάσει λωρίδας σε καμπύλη



Ταυτόχρονη αλλαγή λωρίδας



Παρακολούθηση προπορευόμενου οχήματος σε καμπύλη

Καταγραφή δεδομένων:



Γωνία τιμονιού



Πλάγια απόκλιση

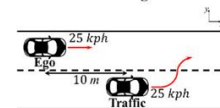


Επιτάχυνση / Ταχύτητα

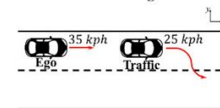


Χρόνος απόκρισης

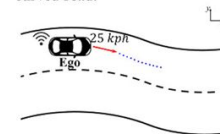
A. Cut-in on a straight road



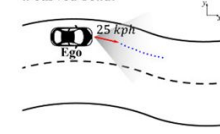
B. Cut-out on a straight road.



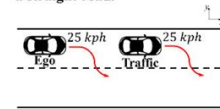
C. GPS based path tracking on a curved road.



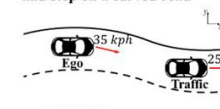
D. Lane based path tracking on a curved road.



E. Simultaneous lane change on a straight road.



F. Preceding vehicle following and stop on a curved road



Εικόνα: Περιπτώσεις δοκιμών XILS

Αποτελέσματα

Συσχέτιση simulation ↔ πραγματικότητα:



• Διαμήκης συμπεριφορά: 92–97%



• Εγκάρσια συμπεριφορά: 85–90%



• Σύνθετες κινήσεις: ~80–85%

Επαναληψιμότητα:

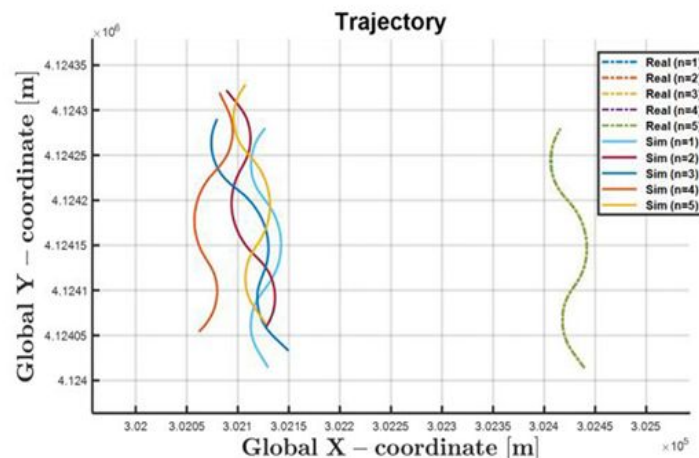


• Η προσομοίωση εμφανίζει μεγαλύτερη συνέπεια από το πραγματικό όχημα

Συμπέρασμα:



Κατάλληλο εργαλείο για αξιολόγηση αξιοπιστίας πριν από δοκιμές πεδίου



Εικόνα: Σύγκριση πραγματικής και προσομοιωμένης τροχιάς στο σενάριο C (Trajectory Synchronization)

DeepManeuver (Adversarial Testing)

Πρόβλημα που αντιμετωπίζεται:



Τα κλασικά adversarial attacks στις εικόνες **δεν** αποκαλύπτουν failure modes



Το όχημα αλλάζει συνεχώς κατάσταση → απαιτείται **state-adaptive προσέγγιση**

Βασική ιδέα DeepManeuver:



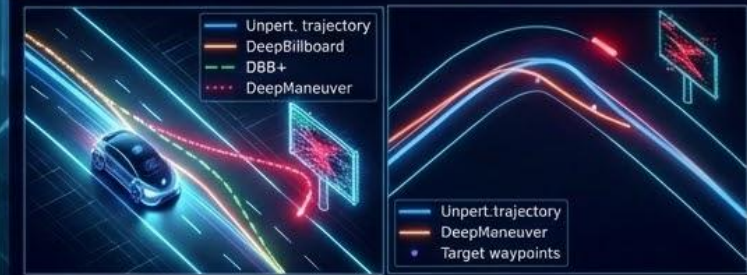
Συνεχής ανανέωση της επίθεσης σε κάθε χρονικό βήμα



Χρήση προσομοιωτή μέσα στον βρόχο βελτιστοποίησης



Στόχος: απόκλιση της τροχιάς



Εικόνα: Η επίθεση στο billboard προκαλεί σημαντική απόκλιση της τροχιάς του οχήματος (perturbed trajectories).

Αρχιτεκτονική DeepManeuver

Κύρια συστατικά:



BeamNG simulator



Καταγραφή τρέχουσας κατάστασης



Δημιουργία νέας διαταραχής κάθε timestep



Βελτιστοποίηση για μεγιστοποίηση της λάθος πορείας

Τύποι ελιγμών:



Έξοδος από λωρίδα



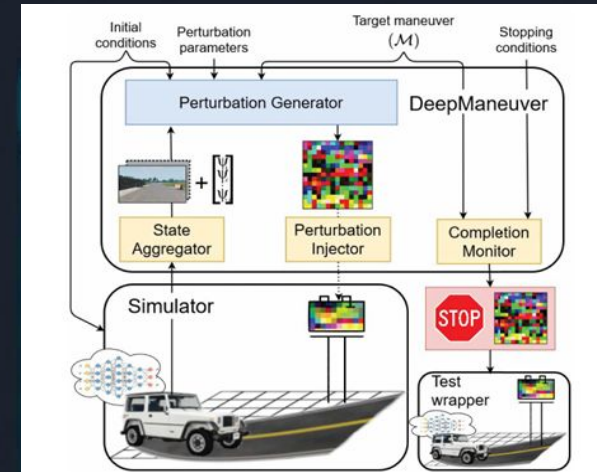
Off-road



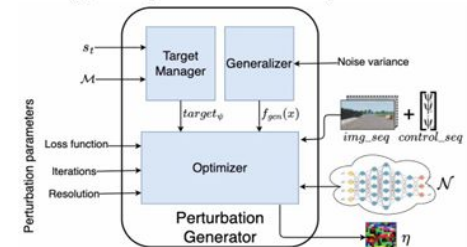
Ανεπιθύμητη στροφή



Multi-target σενάρια



(a) Conceptual Overview of DeepManeuver.



Εικόνα: Αρχιτεκτονική του DeepManeuver — ο προσομοιωτής συμμετέχει στον βρόχο βελτιστοποίησης της επίθεσης.

Αποτελέσματα DeepManeuver

Κύρια Αποτελέσματα:



+20.7% μεγαλύτερη επιτυχία από υπάρχουσες μεθόδους



≥52% επιτυχία σε πολύ-στοχευμένους ελιγμούς



Μεγαλύτερη απόκλιση τροχιάς (ADOT)

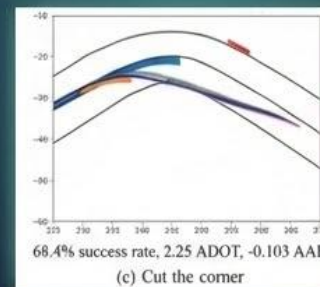
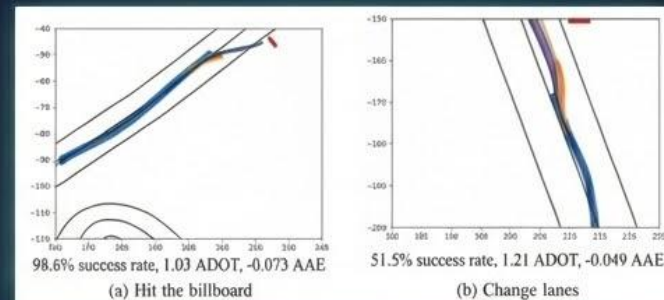


Αποκαλύπτει failure modes που οι κλασικές δοκιμές δεν εντοπίζουν

Συμπέρασμα:



Ισχυρή τεχνική για robustness testing AI συστημάτων αυτόνομης οδήγησης



Εικόνα: Αποτελέσματα της μεθόδου σε multi-target σενάρια: σύγκρουση με billboard, απόκλιση λωρίδας και λάθος στροφή.

Vehicle-In-The-Loop-Simulation



Ρεαλιστική προσομοίωση με δυναμικά χαρακτηριστικά αυτόνομης οδήγησης.



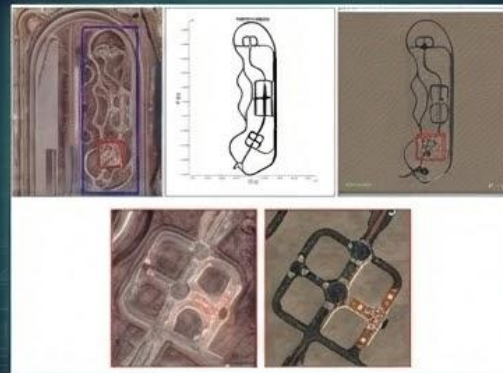
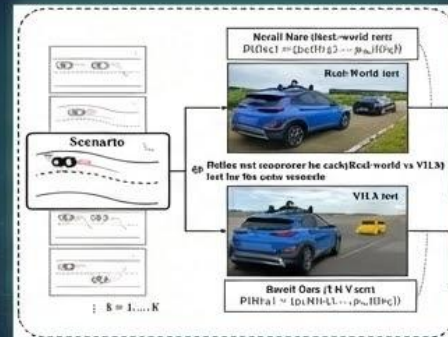
Ενσωμάτωση αισθητήρων στο αυτόνομο όχημα.



Δημιουργία πίστας (virtual environment generation).



Έλεγχος αξιοπιστίας μέσω σύγκρισης προσομοίωσης και πραγματικού σεναρίου.



Εφαρμογή VILS περιβάλλοντος

1. Δημιουργία εικονικού δρόμου.



- Ακρίβεια καμπυλότητας έως και 2 δεκαδικά ψηφία
- Τυπική σχεδίαση επιφάνειας ασφάλτου

2. Χρονικός συγχρονισμός προσομοίωσης με πραγματικό σύστημα μέσω interpolation



$$x_a(t) = x_a(t-1) + \left[v_a(t) + \frac{(x_a(t_i) - x_a(t-1) * \rho)}{\Delta t} \right] * \Delta t$$

3. Εφαρμογή δυναμικών εξισώσεων και στροφών συντεταγμένων



$$[\dot{x}(t) \ \dot{y}(t)]^T = R_z(\psi)v$$

$$v_i(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t a(\tau)dt$$

4. Εισαγωγή θορύβου στις μετρήσεις των αισθητήρων



$$\varepsilon_i = h_i - \hat{h}_i, \quad \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \mu)^2,$$
$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i, \quad \mathcal{N}_{\mu, \sigma^2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\alpha - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Μορφή Ελέγχου αυτόνομης οδήγησης

Εξισώσεις Κατάστασης & Σφάλματα



$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} c_d - c_p \\ v_p - v_e \end{bmatrix}$$

➔ Σφάλμα σχετικής θέσης

➔ Σφάλμα ταχύτητας παρακολούθησης

Συνάρτηση Κόστους & Trade-off

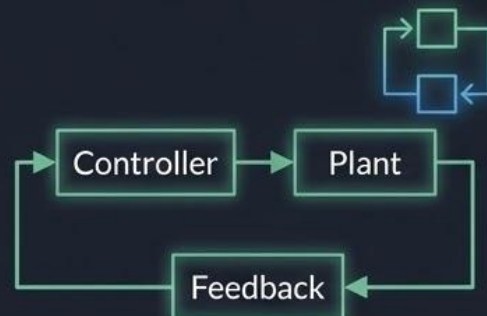


$$J = \int_0^\infty (x^T \bar{Q} x + u^T \bar{R} u) dt$$

Trade off: Περιορισμός Σφάλματος Κατάστασης vs. Εντολής Ελέγχου

Δομή Ελέγχου

$$a_{x,\text{des}} = -Kx$$



Μέθοδος αξιολόγησης μεθοδολογίας

Σύγκριση συνολικής διαδικασίας



1. Δημιουργία Κ επαναλαμβανόμενων σεναρίων και εφαρμογή τους στο πραγματικό και εικονικό περιβάλλον.



2. Μετρικές σύγκρισης πραγματικού/πραγματικού εικονικού/εικονικού πραγματικού/εικονικού.



3. Ορισμός Correlation/Applicability index για τον έλεγχο αξιοπιστίας των σεναρίων.

Ορισμός σεναρίων και αξιολόγηση



1. Εφαρμογή 6 σεναρίων με Longitudinal, Lateral και συνδυαστικού ελέγχου.



2. Επιλογή σημαντικών παραμέτρων ανά σενάριο και μοντελοποίηση αβεβαιότητας αισθητήρων.



3. Επιλογή συγκεκριμένων metrics και συνδυασμός αυτών για την παραγωγή similarity index (έλεγχος αξιοπιστίας)

$$Y = \eta_1 f_1 + \eta_2 (1 - f_2) + \eta_3 (1 - f_3)$$

Εφαρμογή στα πραγματικά σενάρια



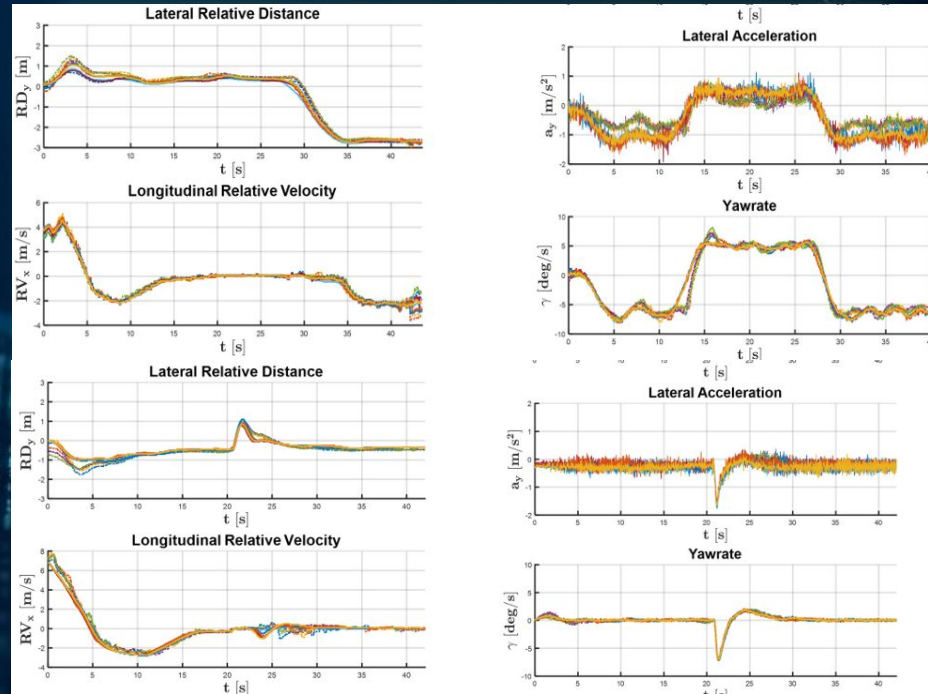
1. Εφαρμογή 6 σεναρίων αυτόνομης οδήγησης: Πλευρικός, Εμπρόσθιος, & Συνδυαστικός Έλεγχος.



2. Σύγκριση πραγματικών δεδομένων με VILS simulations μέσω Similarity Index.



3. Συμπέρασμα Αξιοπιστίας: Επαρκής αξιοπιστία για τα περισσότερα σενάρια. Εξάιρεση: Συνδυαστικά σενάρια.



Συμπεράσματα



Τάση αντικατάστασης πραγματικών σεναρίων αυτόνομης οδήγησης με τεχνητά σενάρια.



Ανάγκη για σενάρια επαναλήψιμα και αναπαραγωγίσιμα.



Υψηλή συσχέτιση σε απλή κίνηση ($\approx 95\%$), χαμηλότερη σε σύνθετη ($\approx 85\%$) με πλήρη εφαρμοσιμότητα



Μελλοντικές προοπτικές για αύξηση της αξιοπιστίας σε μη ιδανικές συνθήκες οδήγησης

TABLE 4. Consistency index for each scenario.




Scenario Index	A	B	C	D	E	F
$s(r_k)$	0.925	0.905	0.954	0.972	0.769	0.927
$s(v_k)$	0.959	0.932	0.977	0.979	0.887	0.929
$s(r_k, v_k)$	0.867	0.866	0.923	0.919	0.643	0.786

TABLE 5. Correlation and applicability indices for each deviation criteria.

Scenario Index	A	B	C	D	E	Criterion
c_k (%)	93.726	95.776	96.731	94.510	83.654	80.999 (α)
s (%)	103.739	102.993	96.234	9.979	84.803	91.509 (β)
Q_k (%)	103.739	102.993	102.484	100.746	115.292	91.506 (β)

Digital-Twin

Εικονικό Περιβάλλον & Παραγωγή Σεναρίων

-  Συνδυασμός εικονικού περιβάλλοντος με πραγματικό.
-  Μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
-  Παραγωγή κρίσιμων σεναρίων στο εικονικό περιβάλλον.



Πλεονεκτήματα & Αποτελέσματα



Μείωση κόστους
πραγματικών δοκιμών.



Έλεγχος πραγματικής
απόδοσης οχήματος.



Εντοπισμός δυσκολιών
στους αλγορίθμους
αυτόνομης οδήγησης.



Εφαρμογή μεθόδου

1. Καλύτερη προσαρμογή σε σύγκριση με παραδοσιακές μορφές αξιοπιστίας αυτόνομης οδήγησης.

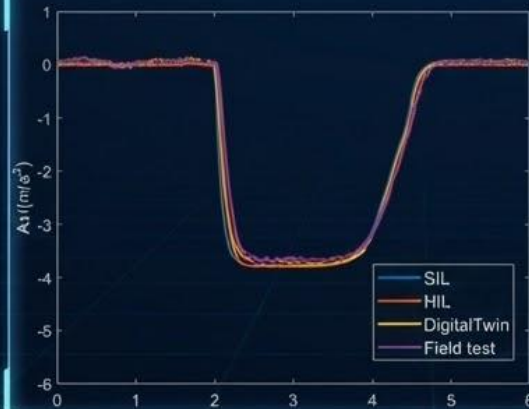


2. Παραγωγή περισσότερων σεναρίων για fault detection σε αλγορίθμους πλοήγησης



COMPARISON WITH OTHER SIMULATION TEST METHODS ABOUT CONFIDENCE LEVEL

Simulation methods	RMSE
Software in the loop	0.231
Hardware in the loop	0.172
Digital Twin test method	0.059



Digital Twin Simulation Scenarios

Συμπεράσματα των paper



XILS (X-in-the-Loop)

Γενικό πλαίσιο αξιολόγησης αξιοπιστίας για προσομοιώσεις (MIL-VILS), με τυποποιημένα metrics σύγκρισης με πραγματικές δοκιμές.



VILS (Vehicle-in-the-Loop)

Δοκιμή πραγματικού οχήματος σε εικονικό περιβάλλον, μειώνοντας το sim-to-real gap και αυξάνοντας την ασφάλεια και την επαναληψιμότητα.



DeepManeuver

Χρησιμοποιεί deep reinforcement learning για παραγωγή adversarial σεναρίων που αποκαλύπτουν σπάνια και κρίσιμα failure cases των συστημάτων αυτόνομης οδήγησης.



Digital Twin

Δυναμικό ψηφιακό αντίγραφο οχήματος και περιβάλλοντος, που επιτρέπει συνεχή παρακολούθηση, ανάλυση και βελτίωση της απόδοσης.

Ο συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων προσφέρει ολοκληρωμένη, ρεαλιστική και αξιόπιστη αξιολόγηση αυτόνομων οχημάτων.

Βιβλιογραφία



T. Oh, S. Cho, and J. Yoo, "A Reliability Evaluation Methodology for X-in-the-Loop Simulation in Autonomous Vehicle Systems," IEEE Access, 2024



M. von Stein, D. Shriver, and S. Elbaum, "DeepManeuver: Adversarial Test Generation for Trajectory Manipulation of Autonomous Vehicles," IEEE Transactions on Software Engineering, 2023.



T. Oh, Y. Ha, D. Yoo, and J. Yoo, "AD-VILS: Implementation and Reliability Validation of Vehicle-in-the-Loop Simulation Platform for Evaluating Autonomous Driving Systems," IEEE Access, 2024



J. Duan, Z. Wang, and X. Jing, "Digital Twin Test Method with LTE-V2X for Autonomous Vehicle Safety Test," IEEE Internet of Things Journal, 2024



Ευχαριστούμε για την προσοχή σας!!



Ερωτήσεις;