ROB-104

Systèmes autonomes et navigation avancée

Leçon 1 — Architecture décisionnelle d’un robot autonome

Collège du Sacré-Cœur de Gatineau, Québec • Faculté d’informatique • Département de robotique, intelligence artificielle et systèmes autonomes

Auteur : Angelo Nibizi, recteur du Collège du Sacré-Cœur de Gatineau, Québec.



Figure 1 — Chaîne fonctionnelle simplifiée, du capteur à l’action.

Objectifs pédagogiques

- Distinguer autonomie, automatisation, téléopération et supervision humaine.
- Décomposer un robot en perception, estimation, décision, planification, contrôle et actionnement.
- Concevoir un automate d’états et définir les transitions nominales et de sécurité.
- Justifier des choix architecturaux avec contraintes de latence, incertitude et sûreté.
- Valider une mission simulée en documentant les décisions et les défaillances.

1. Définition opérationnelle de l’autonomie

Un système robotique autonome poursuit un objectif défini tout en choisissant et adaptant certaines actions à partir de données de son environnement. L’autonomie n’implique ni indépendance absolue, ni absence de limites : elle s’exerce dans un domaine d’utilisation, des contraintes techniques et des règles de supervision spécifiés.

Exemple : un robot de déneigement peut décider de contourner un obstacle et de revenir à sa trajectoire. Il ne doit pas improviser une opération dangereuse lorsque ses capteurs sont aveuglés : son architecture doit alors imposer une réduction de vitesse ou un arrêt sûr.

2. Architecture en couches



Figure 2 — Les décisions de mission sont séparées de l’exécution et de sa vérification.

Perception

Produit des observations : distances, images, vitesses et signaux de santé.

Estimation d’état

Transforme les observations en pose, vitesse, carte et incertitude.

Planification

Choisit un chemin ou une séquence d’actions compatible avec les contraintes.

Contrôle

Transforme une consigne en commandes temporelles pour les actionneurs.

Supervision

Gère les objectifs, priorités, transitions, anomalies, reprise et journalisation.

Les fréquences sont différentes : un contrôleur moteur peut s’exécuter à plusieurs centaines de hertz, tandis que la planification de mission fonctionne plus lentement. Une couche lente ne doit pas bloquer une boucle de sécurité rapide.

3. Automates finis et décisions explicites

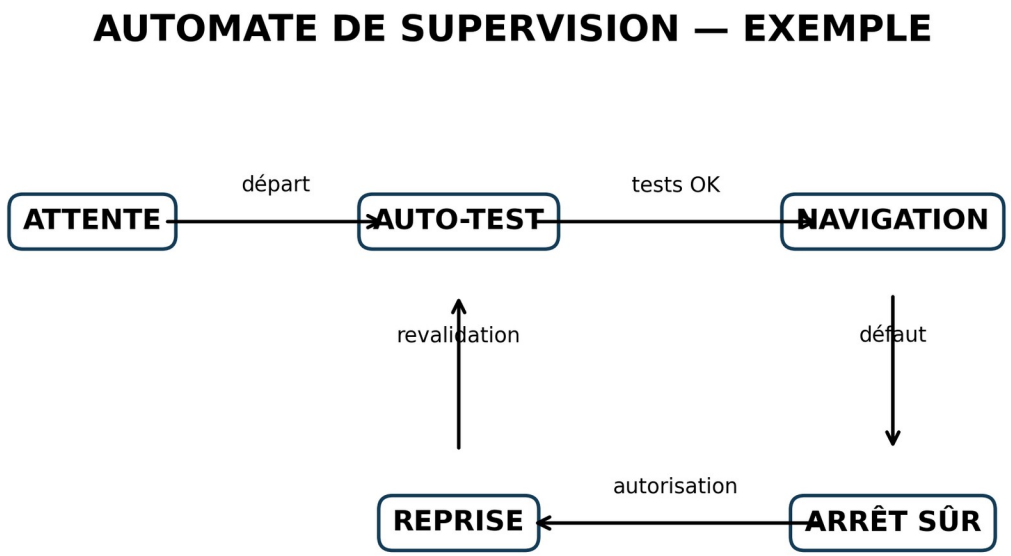


Figure 3 — Exemple de machine à états : chaque transition exige une condition vérifiable.

Un automate fini représente le fonctionnement par un ensemble d’états S, d’événements E et une fonction de transition $\delta : S \times E \to S$. Pour un robot mobile, les états possibles sont ATTENTE, AUTO-TEST, NAVIGATION, ARRÊT SÛR et REPRISE. La transition de REPRISE vers

NAVIGATION ne doit pas se produire sans vérification des préconditions.

4. Arbres de comportement et arbitrage

Un arbre de comportement (Behavior Tree) compose des conditions et actions à l’aide de nœuds Sequence, Selector/Fallback et Action. Une Sequence réussit si ses enfants réussissent; un Selector essaie ses alternatives selon l’ordre défini. Ce modèle convient aux missions complexes mais doit être accompagné de règles explicites de priorité et d’arrêt.

Exemple de priorité : arrêt d’urgence > protection des personnes > stabilité du robot > mission > optimisation de la durée. Une commande de mission ne doit jamais neutraliser la couche de sûreté.

5. Décision sous incertitude

La décision s’appuie sur une estimation imparfaite. Un modèle simple de coût pour une action a est $J(a)=w_1T(a)+w_2E(a)+w_3R(a)$, où T représente le temps, E la dépense énergétique et R un indicateur de risque. Les poids w_i expriment les priorités de la mission; les contraintes de sûreté sont imposées séparément et ne sont pas échangeables contre un gain de vitesse.

Exemple numérique entièrement résolu

Un robot dispose de deux itinéraires. Route A : temps 18 s, énergie 6 unités, indicateur de risque 2. Route B : temps 24 s, énergie 4 unités, indicateur de risque 1. Avec $w_1=1$, $w_2=2$, $w_3=10$, on calcule $J(A)=18+2\times6+10\times2=50$ et $J(B)=24+2\times4+10\times1=42$. Le planificateur choisit B, si les deux routes respectent préalablement toutes les contraintes de sûreté.

6. Surveillance et comportement en défaut



Figure 4 — La détection d’une panne conduit à une décision de sûreté avant toute reprise.

Chaque source doit posséder un contrat : unité, repère, fréquence, délai maximal de fraîcheur, plage plausible et stratégie de repli. Une caméra peut être disponible mais fournir une image inexploitable; un LiDAR peut continuer à publier des données trop anciennes. L’état « processus actif » n’est donc pas synonyme de « perception fiable ».

7. Étude de cas : robot de service dans un bâtiment

Mission : apporter un colis de la salle A à la salle B. Le robot vérifie sa batterie et ses capteurs, se localise, planifie, avance à vitesse limitée, contourne un obstacle et confirme la livraison. Si une personne entre dans sa zone de protection, il s’arrête. Si la localisation devient incertaine, il demande une nouvelle localisation ou une intervention supervisée selon le niveau de risque.

8. Laboratoire à distance — simulation guidée

- Créer cinq états : ATTENTE, AUTO-TEST, NAVIGATION, ARRÊT SÛR, REPRISE.
- Définir au moins deux événements par état et écrire les conditions de transition.
- Simuler une carte de couloir avec un obstacle mobile.
- Implémenter un coût de trajet et comparer deux routes.

- Injecter une perte LiDAR de 1 seconde et documenter le comportement sûr.
- Produire un journal : timestamp, état, événement, décision, justification et résultat.
- Rejouer la mission avec un capteur rétabli et vérifier que la reprise est contrôlée.

9. Évaluation progressive et corrigé

Question 1. Différence entre planification et contrôle ?

Corrigé : La planification choisit une trajectoire ou une action; le contrôle calcule les commandes nécessaires à son exécution.

Question 2. Pourquoi séparer mission et sûreté ?

Corrigé : Pour que les objectifs de performance ne puissent pas contourner les contraintes de protection.

Question 3. Que doit contenir une transition ARRÊT SÛR → REPRISE ?

Corrigé : Une autorisation et la revalidation des conditions nécessaires, dont la santé des capteurs.

Question 4. Quel itinéraire choisir dans l’exemple numérique ?

Corrigé : B : son coût est 42 contre 50 pour A, sous réserve de satisfaire les contraintes.

Question 5. Une donnée reçue à l’instant t−2 s est-elle toujours valide ?

Corrigé : Non : cela dépend du délai de fraîcheur exigé pour cette donnée et la mission.

10. Film pédagogique — séance 1

Séquence 1 : un professeur présente le robot réel et nomme ses capteurs. Séquence 2 : l’étudiant suit à l’écran la chaîne perception →

estimation → décision → action. Séquence 3 : un obstacle apparaît et le robot choisit une route alternative. Séquence 4 : une panne de perception survient; le robot s’arrête en sécurité. Séquence 5 : discussion professeur–étudiant sur la reprise. Séquence 6 : résolution au tableau du coût des deux itinéraires. Les dialogues sont naturels et distincts, sans narration mécanique.

Références de travail

Références recommandées pour approfondissement : ROS 2 (documentation sur les nœuds, topics et actions), Navigation2 (Behavior Trees et navigation), ISO 12100 (principes d’appréciation du risque), et documentation du fabricant du robot utilisé. Les versions et exigences applicables doivent être vérifiées lors de l’intégration sur matériel réel.