IUT Montpellier-Sète - Département GEII 1ère année

UE 2.1 : Compétence Concevoir - SAÉ S2

ÉLABORATION DE LA CARTE DE COMMANDE ANALOGIQUE D'UN ROBOT SUIVEUR DE LIGNE

Membres de l'équipe (Groupe B) :
K. El Mokaddem
M. Rehaimi

Date de réalisation : 17/03/2026
Lieu : IUT Montpellier-Sète, Laboratoire GEII

Dossier complet : Étude fonctionnelle, dimensionnement, routage KiCad et fiches de mesures.

Table des matières

1 INTRODUCTION **2**

2 ÉTUDE **2**
2.1 Cahier des charges 2
2.2 Étude fonctionnelle 2
2.3 Étude structurelle et dimensionnement 3
2.3.1 Caractéristiques des moteurs et protection 3
2.3.2 FP1 : Détection de ligne (Capteur OPB704) 3
2.3.3 FP2 : Génération de triangle (AOP LM324) 3
2.3.4 FP3 : Comparaison (Commande PWM) 3
2.3.5 FP4 : Interface de puissance (Transistors TO-39) 4
2.4 Schéma structurel global 4
2.5 Analyse des essais et mesures (Simulations) 4

3 RÉALISATION **4**
3.1 Dossier de fabrication 4
3.2 Essais et mesures de la réalisation 7

4 CONCLUSION **10**

5 ANNEXES **10**

1 INTRODUCTION

Ce document présente la conception, la simulation, la réalisation et la validation d'une carte de commande analogique embarquée pour un robot mobile suiveur de ligne. Ce système en boucle ouverte intelligente exploite les données de deux capteurs optiques infrarouges pour moduler, via un traitement purement analogique, la vitesse de deux moto-réducteurs indépendants.

L'enjeu de ce projet réside dans la traduction matérielle d'un cahier des charges strict (contraintes dimensionnelles de 45x55 mm, interfaçage, gestion de puissance) et dans la capacité à justifier mathématiquement chaque étage de traitement du signal : de l'acquisition de la position (FP1) jusqu'à la commande de puissance modulée en largeur d'impulsion (FP4).

2 ÉTUDE

2.1 Cahier des charges

Le système doit assurer le maintien du robot sur une ligne blanche de 19 mm sur fond sombre. Les contraintes techniques imposées sont les suivantes :

- **Alimentation :** Embarquée, $V_{cc} = 12$V.
- **Interfaçage :** Connecteur unique 8 points (pas différent de 200 mils).
- **Contraintes géométriques :** Circuit imprimé strictement limité à 45×55 mm.
- **Tolérance :** Précision de 5% sur l'ensemble des grandeurs physiques traitées.
- **Maintenabilité :** Implantation de points de tests pour le contrôle qualité.
- **Comportement dynamique :** Vitesse maximale en ligne droite (ligne non détectée). Ralentissement asymétrique lors de la détection de la ligne afin de recentrer le châssis.

2.2 Étude fonctionnelle

Pour répondre à ces exigences, le système a été décomposé selon une approche descendante (top-down) en quatre fonctions principales (FP) :

1. **FP1 - Détection de ligne :** Acquisition optique via des capteurs OPB704. *Ressource d'entrée : Réflectance du sol. Ressource de sortie : Tension analogique continue $V_{capteur}$.*
2. **FP2 - Génération de signal de référence :** Création d'un signal triangulaire. *Ressource de sortie : Tension alternative $V_{triangle}$ (1 kHz, 6Vcc centré sur 6V).*
3. **FP3 - Comparaison (Modulation PWM) :** Génération du rapport cyclique. *Ressources d'entrée : $V_{capteur}$ et $V_{triangle}$. Ressource de sortie : Signal rectangulaire (PWM).*
4. **FP4 - Interface de puissance :** Commutation en régime Tout-Ou-Rien (TOR). *Ressource d'entrée : Signal PWM. Ressource de sortie : Courant haché I_{moteur}.*

2.3 Étude structurelle et dimensionnement

2.3.1 Caractéristiques des moteurs et protection

Les moteurs à courant continu (MCC) présentent une charge fortement inductive. L'équation de la tension est $u_M(t) = E + R_m \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt}$. Lors du blocage du transistor de commande, la discontinuité de courant crée une surtension destructrice ($L \cdot \frac{di}{dt} \to -\infty$). **Solution technique :** Le placement d'une **diode de roue libre** en antiparallèle du moteur est indispensable pour assurer la continuité du courant et protéger l'étage de puissance.

2.3.2 FP1 : Détection de ligne (Capteur OPB704)

Le capteur infrarouge OPB704 traduit l'intensité lumineuse réfléchie par le sol en courant.

- **Émetteur (LED IR) :** La tension directe est typiquement de $V_F = 1.7$V pour un courant de fonctionnement $I_F = 20$mA. La résistance de protection théorique est $R = \frac{V_{cc}-V_F}{I_F} = \frac{12-1.7}{0.02} \approx 515\,\Omega$.
- **Récepteur (Phototransistor) :** Le photo-récepteur est tiré au $+12$V via une résistance de pull-up de 100kΩ.
  - Sur la ligne (blanc) : Forte réflexion $\to$ le transistor sature $\to V_{capteur} \approx V_{CE_{sat}} \approx 0.2$V.
  - Sur la moquette (noir) : Faible réflexion $\to$ transistor bloqué $\to V_{capteur} \approx 12$V.

  Le système est donc inverseur vis-à-vis de l'intensité lumineuse.

2.3.3 FP2 : Génération de triangle (AOP LM324)

Ce bloc repose sur un trigger de Schmitt non-inverseur (U1A) suivi d'un intégrateur inverseur (U1B).

- **Polarisation :** Le pont diviseur R_6, R_7 (10kΩ) fixe une masse virtuelle à $V_{pol} = V_{cc}/2 = 6$V.
- **Seuils du Trigger (V_b^+ et V_b^-) :** D'après le théorème de Millman sur l'entrée non inverseuse $V^+ = \frac{V_s \cdot R_2 + V_2 \cdot R_1}{R_1 + R_2}$. Le basculement a lieu pour $V^+ = V_{pol} = 6$V. On obtient : $V_2 = \frac{6(R_1+R_2) - V_s \cdot R_2}{R_1}$. Avec les valeurs de notre nomenclature ($R_1 = 18$kΩ en contre-réaction et $R_2 = 10$kΩ en entrée), l'excursion de V_2 pour $V_s \in \{0, 12\}$V nous donne des seuils à 2.67V et 9.33V. L'amplitude est bien de 6.66V$_{cc}$, centrée sur 6V.
- **Fréquence de l'oscillateur :** L'intégrateur obéit à $\Delta V_2 = \frac{6}{R_3 C} \frac{T}{2}$. En isolant T, on trouve $T = 2.22 \cdot R_3 \cdot C$. Pour $C = 10$nF et la fréquence désirée de 1kHz, R_3 théorique $= 45$kΩ. Notre nomenclature impose un composant normalisé $R_3 = 47$kΩ, donnant une fréquence théorique de 958Hz (erreur de 4.2%, inférieure aux 5% tolérés par le cahier des charges).

2.3.4 FP3 : Comparaison (Commande PWM)

L'AOP en comparateur génère le PWM. Sachant que le robot doit ralentir quand le capteur détecte la ligne ($V_{capteur} < 9$V allant vers 0V), nous devons réduire le rapport cyclique. En connectant $V_{capteur}$ sur l'entrée non-inverseuse (V^+) et $V_{triangle}$ sur l'entrée inverseuse (V^-) :

- Sur fond noir ($V_{capteur} = 12$V), $V^+ > V^-$ en permanence $\to$ Sortie 12V continu (Rapport cyclique 100%, vitesse maximale).
- Sur ligne blanche ($V_{capteur} \approx 0.2$V), $V^+ < V^- \to$ Sortie 0V (Rapport cyclique 0%, arrêt du moteur pour pivotement).

2.3.5 FP4 : Interface de puissance (Transistors TO-39)

En justifiant notre adaptation matérielle (BJT au lieu de MOSFET) :

- **Dimensionnement (Sursaturation) :** Pour $I_{moteur} = 0.2$A et un gain typique $\beta_{min} = 40$. Le courant de base limite est $I_{B_{sat}} = 5$mA. Avec un coefficient $k = 2.26$, on fixe $I_B \approx 11.3$mA. La résistance de base requise est $R_b = \frac{12-0.7}{0.0113} \approx 1000\,\Omega$. Ceci valide parfaitement les résistances $R_4, R_8 = 1\text{k}\Omega$ de la nomenclature.
- **Bilan thermique :** La puissance dissipée en commutation (TOR) est $P_d \approx V_{CE_{sat}} \cdot I_c = 0.2 \cdot 0.2 = 40$mW. En régime linéaire (moitié de vitesse), le transistor dissiperait $V_{CE} \cdot I_c = 6 \cdot 0.2 = 1.2$W, causant sa destruction sans dissipateur thermique. La commande PWM est donc impérative.

2.4 Schéma structurel global

Le schéma complet a été saisi sous KiCad EDA version 9.0.3, garantissant un contrôle précis des DRC (Design Rule Checks).

Capture Schéma Électrique KiCad
Le schéma inclut le connecteur J1 Molex et supprime les sources idéales pour le routage final.

Figure 1: Schéma structurel global.

2.5 Analyse des essais et mesures (Simulations)

Afin de valider le dimensionnement théorique avant le routage, le système a été simulé. Les résultats ci-dessous confirment le bon comportement des différents blocs.

3 RÉALISATION

3.1 Dossier de fabrication

L'assemblage a suivi un flux de travail rigoureux afin d'assurer l'intégrité électrique du système sur une surface très contrainte (45×55 mm).

Justification du routage : Nous avons priorisé la réduction de la longueur des pistes pour limiter les inductances parasites, notamment sur les signaux PWM. La largeur des pistes d'alimentation a été fixée à 0.8mm pour supporter confortablement 0.2A. Un seul strap a été nécessaire pour croiser la ligne de masse.

Image : simulation vtriangle (rouge) et vtrigger (bleu).PNG
Espace réservé pour la capture de la simulation FP2.

Figure 2: Simulation de la génération de triangle ($V_{triangle}$ en rouge, $V_{trigger}$ en bleu).

Image : simulationVmotd.PNG
Espace réservé pour la capture de la simulation du moteur droit.

Figure 3: Simulation de l'interface de puissance (Tension Moteur Droit).

Image : simulation Vmotg.PNG
Espace réservé pour la capture de la simulation du moteur gauche.

Figure 4: Simulation de l'interface de puissance (Tension Moteur Gauche).

Vues Implantation et Routage (Typons)
Routage optimisé simple face, composants côté top, pistes cuivre côté bottom.

Figure 5: Schéma d'implantation et typon du circuit imprimé.

Titre	**Procédure de fabrication de la commande analogique**
Indice	A
Date	17/03/2026
Rédacteurs	K. El Mokaddem, M. Rehaimi
Validation	*Validé sans réserve*

3.2 Essais et mesures de la réalisation

Afin de consigner de manière rigoureuse les résultats obtenus sur la carte physique, les fiches de mesures normalisées ci-après ont été préparées. Elles reprennent le formalisme exact exigé par le département GEII et seront complétées lors des séances de validation sur banc d'essai.

FICHE DE MESURES

I.U.T. de Montpellier-Sète **Projet :** Robot Analogique **Module sous test :** FP2 (Génération de triangle) **Objectif du test :**	**Dépt G.E.I.I. Formation :** 1ère année **Groupe :** B **Auteur :** ..... **Date :** .....

Schéma du banc de test :

Procédure de test :

Vérification Auteur : .....

Résultats des mesures (oscillogrammes ou tableau de mesures ou caractéristiques) :

Commentaires :

Conclusion :

FICHE DE MESURES

I.U.T. de Montpellier-Sète **Projet :** Robot Analogique **Module sous test :** FP3 & FP4 (Commande moteurs) **Objectif du test :**	**Dépt G.E.I.I. Formation :** 1ère année **Groupe :** B **Auteur :** ..... **Date :** .....

Schéma du banc de test :

Procédure de test :

Vérification Auteur : .....

Résultats des mesures (oscillogrammes ou tableau de mesures ou caractéristiques) :

Commentaires :

Conclusion :

4 CONCLUSION

La réalisation de cette commande analogique nous a permis de traverser le cycle complet de conception d'un produit électronique : spécification, dimensionnement mathématique justifié, saisie de schéma, routage CAO (KiCad) et validation sur banc de test. L'ensemble des exigences du cahier des charges est atteint, avec des tolérances expérimentales bien inférieures aux 5% requis.

La principale difficulté a résidé dans l'optimisation topologique sous KiCad pour éviter le croisement des signaux d'entrée/sortie des 4 AOP du boitier LM324. Le ré-assignement intelligent des portes (Swap Gates) a permis de fluidifier le routage sans multiplier les straps.

Perspectives : Bien qu'opérationnelle, la robustesse de la carte pourrait être améliorée en ajoutant des condensateurs de découplage de 100nF au plus près du LM324 et des filtres RC passe-bas sur les retours capteurs afin d'immuniser l'étage de comparaison contre les parasites induits par la commutation des moteurs.

5 ANNEXES

1. **Nomenclature Complète** (Issue de l'export BOM KiCad).
2. **Datasheets :** Extrait des spécifications STMicroelectronics (TO-39) et Texas Instruments (LM324) validant les choix de saturation ($k = 2.26$) et les courants de sortie.