

EchoBot — Téléopération par imitation visuelle

Projet Robotique R&D

Victor Flattot – Romain Tibaudo – Anas Malhouq

Polytech Nice Sophia – Robotique

Janvier 2026

Résumé

Ce rapport présente **EchoBot**, un système de téléopération visant à reproduire les mouvements d'un bras mannequin passif (leader) sur un bras robotisé motorisé (follower). Une caméra observe le bras leader équipé de marqueurs ArUco. Les poses des segments sont estimées par vision (solvePnP), puis converties en rotations relatives afin d'en déduire les angles articulaires. Les commandes sont ensuite transmises via TCP au bras robotisé, dont les moteurs sont pilotés à l'aide de la librairie *LeRobot*. L'objectif est de proposer une méthode rapide et intuitive de guidage, limitant la nécessité de reprogrammation et permettant une manipulation à distance d'une cellule sécurisée.

Mots-clés : robotique collaborative, téléopération, imitation, ArUco, vision par ordinateur, cinématique, TCP, LeRobot.

Table des matières

1	Introduction	3
2	Objectifs et périmètre	3
3	Architecture globale du système	3
3.1	Vue d'ensemble	3
3.2	Chaîne de traitement	3
3.3	Séparation leader / follower	4
3.4	Flux de données	4
4	Matériel : bras SO-101 leader et follower	4
4.1	Présentation des bras SO-101	4
4.2	Bras leader : mannequin passif	4
4.3	Bras follower : bras robotisé motorisé	4
4.4	Correspondance géométrique leader / follower	6
4.5	Avantages du choix matériel	6
5	Vision par ordinateur : marqueurs ArUco et estimation de pose	6
5.1	Principe général	7
5.2	Prétraitement des images	7
5.3	Détection des marqueurs ArUco	7
5.4	Estimation de la pose par solvePnP	7
5.5	Conversion en angles d'Euler et affichage	7
5.6	Limites de l'approche visuelle	7
6	Calibration et référentiels	7
6.1	Problématique des orientations multiples	8
6.2	Choix d'un repère de référence	8
6.3	Matrices de correction géométrique	8
6.4	Sélection dynamique du marqueur	8

7	Calcul des angles articulaires	8
7.1	Rotations absolues des segments	8
7.2	Calcul des rotations relatives	9
7.3	Extraction des angles de commande	9
7.4	Calibration zéro et offsets	9
7.5	Stabilité et perspectives	9
8	Communication réseau et commande du bras robotisé	9
8.1	Architecture client–serveur	9
8.2	Format des messages	10
8.3	Envoi des commandes côté serveur	10
8.4	Réception et décodage côté client	10
8.5	Commande des moteurs avec LeRobot	10
8.6	Contraintes temporelles et limites	10
9	Résultats expérimentaux et démonstrations	11
9.1	Conditions expérimentales	11
9.2	Validation de la détection et de l’estimation de pose	11
9.3	Reproduction des mouvements par le bras robotisé	11
9.4	Latence et comportement dynamique	11
9.5	Limites observées	12
9.6	Démonstration du concept EchoBot	12
10	Discussion et perspectives	12
10.1	Analyse critique des choix techniques	12
10.2	Limites actuelles du système	12
10.3	Axes d’amélioration	12
10.4	Applications potentielles	13
11	Conclusion générale	13

1 Introduction

La robotique collaborative vise à améliorer la flexibilité et la sécurité des systèmes industriels en facilitant l'interaction entre un opérateur humain et un robot. Dans de nombreux environnements, le robot est isolé dans une cellule sécurisée et la reprogrammation d'une tâche (ou le réglage d'une trajectoire) peut devenir coûteuse en temps, en expertise et en immobilisation de la ligne.

Dans ce contexte, la téléopération par imitation constitue une approche pertinente : un opérateur guide un dispositif de référence et le robot reproduit le mouvement, sans programmer explicitement une trajectoire. Ce principe est particulièrement utile pour des phases de mise au point, d'apprentissage rapide, ou pour manipuler un robot lorsque l'accès direct est contraint.

Le projet **EchoBot** s'inscrit dans cette démarche. L'objectif est de reproduire en temps quasi réel les mouvements d'un bras *leader* (bras mannequin passif) sur un bras *follower* (bras robotisé motorisé). Une caméra observe le bras leader équipé de marqueurs ArUco. Les orientations des segments sont estimées par vision, puis converties en rotations relatives permettant d'obtenir des angles articulaires. Ces commandes sont ensuite transmises via le réseau au bras motorisé, qui exécute les mouvements à l'aide de la librairie *LeRobot*.

Ce rapport décrit l'architecture du système, les choix matériels, la chaîne de vision (détection ArUco et estimation de pose), la calibration géométrique des repères, le calcul des angles articulaires, puis la transmission et la commande du bras robotisé. Les résultats expérimentaux et les limites observées sont enfin discutés, avec des perspectives d'amélioration.

2 Objectifs et périmètre

Le projet EchoBot vise à réaliser une chaîne complète de téléopération par imitation visuelle, depuis l'acquisition vidéo jusqu'à l'exécution des mouvements sur un bras motorisé. Les objectifs principaux sont :

- Estimer la pose des segments du bras leader à partir d'une caméra unique et de marqueurs ArUco.
- Convertir les orientations mesurées en angles articulaires exploitables pour la commande du bras follower.
- Transmettre les commandes en réseau via un protocole léger et robuste (TCP + mot-clé de sécurité).
- Piloter le bras robotisé motorisé avec la librairie *LeRobot*.
- Démontrer la reproduction de mouvements simples et analyser les limites (occlusions, bruit, latence).

Le périmètre du projet se concentre sur la reproduction cinématique (positions articulaires) et la robustesse de la chaîne de traitement. Les aspects de planification de trajectoires complexes, de contrôle en effort, ou d'apprentissage par renforcement ne font pas partie du périmètre principal.

3 Architecture globale du système

3.1 Vue d'ensemble

Le système EchoBot repose sur une architecture modulaire permettant de séparer clairement les différentes fonctions : perception, calcul géométrique, communication et commande. Cette organisation facilite le débogage, l'évolution du projet et l'intégration progressive de nouvelles fonctionnalités.

Le principe général est le suivant : une caméra observe un bras mannequin passif (*leader*) équipé de marqueurs ArUco. Les orientations des segments sont estimées à partir de l'image, puis converties en angles articulaires. Ces angles sont transmis via le réseau à un bras robotisé motorisé (*follower*), qui reproduit le mouvement.

3.2 Chaîne de traitement

La chaîne complète de traitement peut être décomposée en cinq étapes principales :

1. **Acquisition vidéo** : capture d'images RGB (et éventuellement profondeur) depuis la caméra.
2. **Vision par ordinateur** : détection des marqueurs ArUco et estimation de leur pose dans le repère caméra.
3. **Géométrie et cinématique** : correction des repères, calcul des rotations absolues des segments, puis des rotations relatives entre segments adjacents afin d'extraire les angles articulaires.
4. **Transmission réseau** : envoi des angles sous forme de paquets binaires via une connexion TCP sécurisée.
5. **Commande du bras robotisé** : réception des données, conversion en consignes articulaires et pilotage des moteurs via la librairie *LeRobot*.

3.3 Séparation leader / follower

Le système distingue clairement deux entités :

- le **bras leader**, ou bras mannequin, manipulé directement par l’opérateur humain. Il ne contient aucun moteur et sert uniquement de référence de mouvement ;
- le **bras follower**, ou bras robotisé motorisé, qui reçoit les commandes calculées et exécute physiquement le mouvement.

Cette séparation permet à l’opérateur de guider le robot sans entrer dans la cellule sécurisée, ce qui constitue un avantage important en contexte industriel.

3.4 Flux de données

Le flux de données est unidirectionnel et suit la séquence suivante :

Caméra → Vision → Calcul d’angles → TCP → Commande moteurs

Chaque module échange uniquement les informations nécessaires, ce qui limite les dépendances et rend le système plus robuste face aux erreurs locales (perte d’un marqueur, latence réseau, etc.).

Cette architecture constitue la base sur laquelle s’appuient les parties suivantes du rapport, détaillant successivement le matériel utilisé, la vision par ordinateur, la calibration géométrique et la commande du bras robotisé.

4 Matériel : bras SO-101 leader et follower

4.1 Présentation des bras SO-101

Le système EchoBot repose sur l’utilisation de deux bras de type **SO-101**, partageant une géométrie mécanique identique. Cette caractéristique est un point clé du projet, car elle permet d’établir une correspondance directe entre les segments du bras leader et les articulations du bras follower.

Chaque bras est constitué d’une base fixe et de plusieurs segments articulés formant une chaîne cinématique sérieuse. Le nombre d’articulations et leur disposition sont identiques sur les deux bras, ce qui simplifie le calcul et la reproduction des mouvements.

4.2 Bras leader : mannequin passif

Le bras leader est un **bras mannequin passif**, manipulé directement par l’opérateur humain. Il ne contient aucun actionneur et ne nécessite aucune alimentation électrique. Son rôle est uniquement de servir de référence de mouvement pour la téléopération du bras robotisé.

Afin de permettre l’estimation de sa pose par vision, plusieurs **marqueurs ArUco** sont fixés rigidement sur les différents segments du bras, comme illustré en Figure 1. Chaque marqueur est associé à un segment précis et placé sur une face connue (haut, côté, etc.), information exploitée ultérieurement lors de la calibration géométrique des référentiels.

L’opérateur peut ainsi guider librement le bras leader de manière intuitive, sans contrainte logicielle ni programmation préalable. Cette approche permet de définir des mouvements naturels tout en évitant l’intégration de capteurs embarqués complexes sur le dispositif de guidage.

4.3 Bras follower : bras robotisé motorisé

Le bras follower est un **bras SO-101 motorisé**, mécaniquement identique au bras leader, mais équipé de servomoteurs commandant chacune des articulations. Il reçoit des consignes d’angles articulaires calculées à partir des mouvements observés sur le bras mannequin.

La Figure 2 présente le bras robotisé utilisé dans le projet. Chaque articulation est actionnée par un servomoteur, permettant la reproduction des rotations mesurées sur le bras leader.

La commande des moteurs est réalisée à l’aide de la librairie open-source *LeRobot*, qui fournit une interface de haut niveau pour l’envoi de consignes de position. Cette abstraction logicielle permet de se concentrer sur la génération et la synchronisation des angles articulaires, sans avoir à gérer directement les détails bas niveau des actionneurs (PWM, protocoles spécifiques, limitations matérielles).

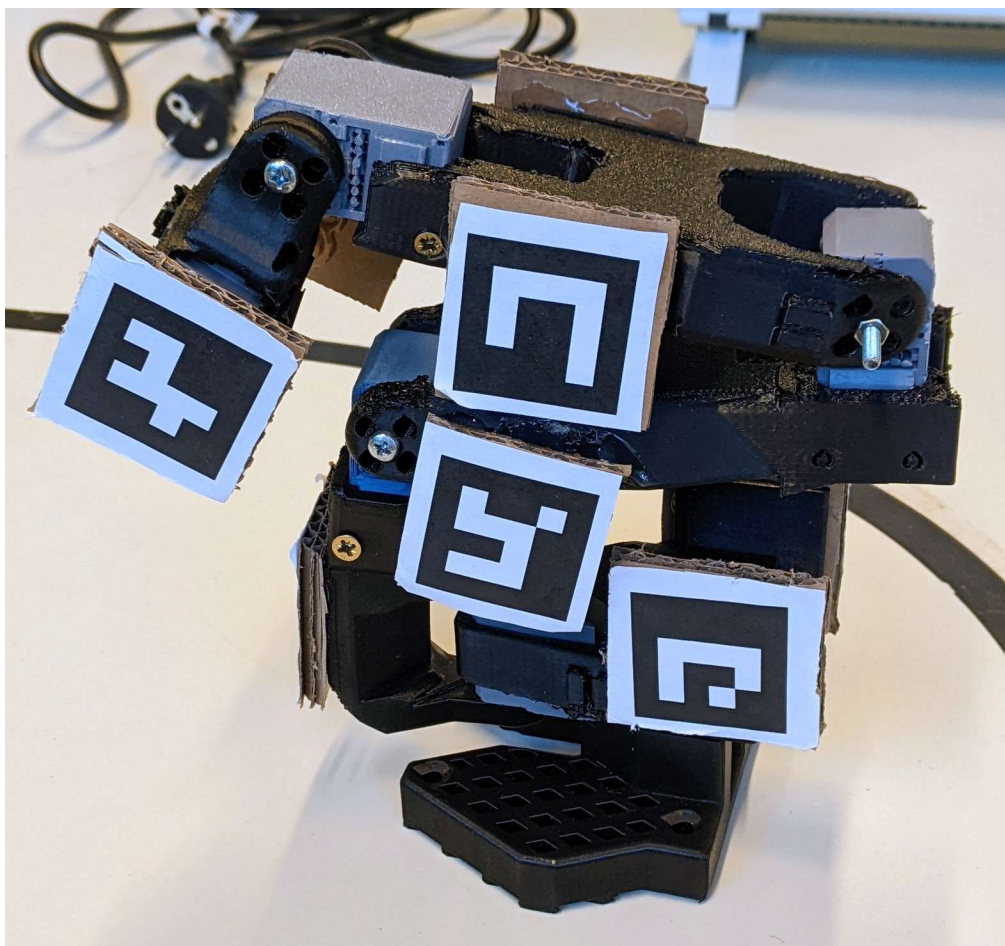


FIGURE 1 – Bras leader (mannequin passif) équipé de marqueurs ArUco fixés sur les différents segments. Les identifiants uniques permettent d'associer chaque détection visuelle à un segment précis du bras.

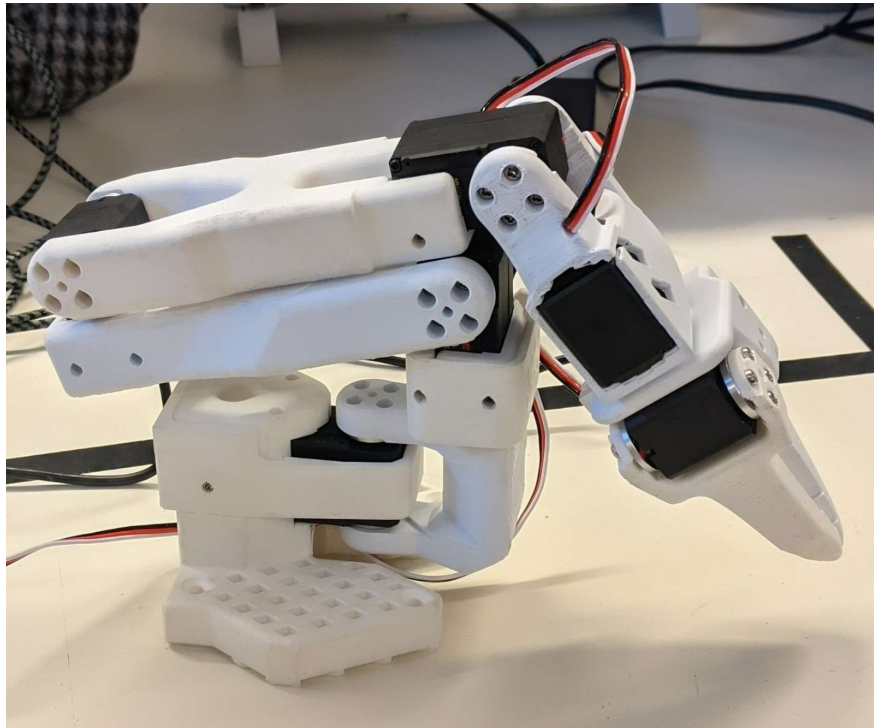


FIGURE 2 – Bras follower SO-101 motorisé utilisé pour la reproduction des mouvements du bras leader.

4.4 Correspondance géométrique leader / follower

L'identité géométrique entre les deux bras permet de définir une correspondance directe :

- chaque segment du bras leader correspond à un segment du bras follower ;
- chaque rotation relative mesurée entre deux segments du leader correspond à une articulation du follower.

Cette hypothèse est fondamentale pour le projet : elle permet d'éviter toute étape complexe de recalcul de cinématique inverse. Les angles extraits à partir des rotations relatives du bras leader peuvent être transmis quasi directement au bras follower.

4.5 Avantages du choix matériel

Le choix d'un bras mannequin passif comme dispositif de guidage présente plusieurs avantages :

- interaction naturelle et intuitive pour l'opérateur ;
- absence de capteurs embarqués complexes (encodeurs, IMU, etc.) sur le leader ;
- réduction des coûts matériels ;
- possibilité de guider le robot sans entrer dans une cellule sécurisée.

Ce choix s'inscrit pleinement dans une logique de robotique collaborative et de prototypage rapide.

5 Vision par ordinateur : marqueurs ArUco et estimation de pose

La vision par ordinateur constitue le point d'entrée du système EchoBot. Elle permet d'observer le bras leader à partir d'une caméra monoculaire et d'estimer, en temps quasi réel, l'orientation spatiale de chacun de ses segments. L'ensemble de la chaîne de vision a été implémenté en C++ à l'aide de la bibliothèque *OpenCV*, et repose sur l'utilisation de marqueurs ArUco pour l'estimation de pose.

Le choix d'une approche purement visuelle permet d'éviter l'intégration de capteurs embarqués sur le bras leader (encodeurs, IMU), tout en conservant une estimation exploitable des orientations articulaires.

5.1 Principe général

Chaque segment du bras leader est équipé d'un ou plusieurs marqueurs ArUco, fixés rigidement sur des faces connues. La caméra observe la scène et fournit un flux d'images RGB, qui est traité image par image. À partir de ces images, les marqueurs sont détectés, identifiés, puis leur pose tridimensionnelle est estimée dans le repère de la caméra. Les matrices de rotation obtenues constituent la base du calcul géométrique des angles articulaires.

5.2 Prétraitement des images

Les images acquises par la caméra sont tout d'abord converties en niveaux de gris afin de simplifier le traitement et de réduire la sensibilité aux variations chromatiques. Un filtrage par flou gaussien est ensuite appliqué (noyau 5×5), ce qui permet de réduire le bruit haute fréquence et de stabiliser la détection des contours des marqueurs.

Ce prétraitement améliore significativement la robustesse de la détection, notamment lorsque l'environnement présente des textures marquées ou lorsque de légères variations d'éclairage sont présentes.

5.3 Détection des marqueurs ArUco

La détection des marqueurs est réalisée à l'aide du module `cv::aruco::ArucoDetector` d'OpenCV. Pour chaque image traitée, l'algorithme identifie les marqueurs visibles, retourne leurs identifiants uniques (*IDs*) ainsi que les coordonnées 2D de leurs quatre coins dans l'image.

Les candidats rejetés sont également conservés, ce qui facilite le diagnostic lors des phases de mise au point (faux positifs, détection instable). Cette étape fournit l'ensemble des informations nécessaires à l'estimation de pose tridimensionnelle.

5.4 Estimation de la pose par solvePnP

À partir des coins 2D détectés et d'un modèle 3D connu du marqueur (défini par la taille réelle du carré), la pose du marqueur dans le repère caméra est estimée à l'aide de l'algorithme `solvePnP`. Le modèle 3D est construit dans le plan $Z = 0$, centré sur le marqueur, ce qui permet une correspondance directe avec les coins détectés dans l'image.

L'algorithme `solvePnP` fournit un vecteur de rotation \mathbf{r} et un vecteur de translation \mathbf{t} . Le vecteur de rotation est ensuite converti en matrice de rotation R à l'aide de la formule de Rodrigues. Cette matrice représente l'orientation du marqueur par rapport au repère de la caméra.

Dans EchoBot, seule la composante rotationnelle est exploitée, la translation n'étant pas nécessaire pour le calcul des angles articulaires.

5.5 Conversion en angles d'Euler et affichage

Pour faciliter l'analyse et le débogage, les matrices de rotation sont converties en angles d'Euler (pitch, yaw, roll). Une attention particulière est portée à la gestion des singularités de type *gimbal lock*. Lorsque la configuration approche une singularité, une décomposition alternative est utilisée afin d'éviter des valeurs numériques instables.

Les identifiants des marqueurs ainsi que leurs orientations sont affichés en temps réel sur l'image, superposés à la vue caméra. Cet affichage permet de vérifier visuellement la cohérence des orientations estimées et de valider rapidement le positionnement et l'orientation des marqueurs sur le bras leader.

5.6 Limites de l'approche visuelle

Bien que robuste pour un démonstrateur, cette approche reste sensible aux occultations partielles des marqueurs, au flou de mouvement lors de déplacements rapides, ainsi qu'au bruit inhérent à la détection image par image. Ces limitations justifient la mise en place d'une calibration géométrique des repères, décrite dans la section suivante, et ouvrent la voie à l'ajout futur de mécanismes de filtrage temporel.

6 Calibration et référentiels

Contrairement à une chaîne de vision complète classique, le projet EchoBot ne met pas en œuvre une calibration intrinsèque de la caméra dans son pipeline principal. Les paramètres intrinsèques (matrice de caméra et coefficients de distorsion) sont supposés connus ou préconfigurés. L'effort de calibration se concentre ici sur un aspect géométrique : l'unification des référentiels des marqueurs ArUco associés aux différents segments du bras leader.

6.1 Problématique des orientations multiples

Afin d’assurer une détection robuste quel que soit l’angle de vue, chaque segment du bras leader peut être équipé de plusieurs marqueurs ArUco placés sur différentes faces physiques (haut, bas, nord, sud, est, ouest). Cependant, la pose estimée par la vision dépend directement de l’orientation du marqueur observé. Deux marqueurs fixés sur un même segment mais sur des faces différentes produisent donc des matrices de rotation différentes, bien que le segment réel soit identique.

Il est par conséquent nécessaire de ramener toutes les orientations mesurées dans un **repère de référence commun**.

6.2 Choix d’un repère de référence

Dans EchoBot, la face *haut* de chaque segment est choisie comme repère de référence géométrique. Chaque marqueur détecté est associé :

- à un segment du bras (base, membre 1, membre 2, etc.) ;
- à une face physique du segment sur laquelle il est fixé.

Cette information est stockée dans une table de correspondance reliant l’identifiant du marqueur à son segment porteur et à sa face d’implantation.

6.3 Matrices de correction géométrique

Pour chaque face possible, une matrice de correction R_{corr} est définie. Cette matrice représente la rotation nécessaire pour ramener l’orientation du marqueur observé vers l’orientation équivalente de la face *haut*.

Les matrices de correction sont définies à partir de rotations élémentaires (par exemple $\pm 90^\circ$ ou 180° autour des axes principaux) et sont construites à l’aide de la formule de Rodrigues.

La rotation finale associée à un segment est alors calculée par :

$$R_{\text{cam} \rightarrow \text{segment}} = R_{\text{brut}} \cdot R_{\text{corr}}$$

où R_{brut} est la matrice de rotation issue directement de l’estimation de pose du marqueur par la vision.

6.4 Sélection dynamique du marqueur

Lorsqu’un segment possède plusieurs marqueurs, le système sélectionne dynamiquement le premier marqueur valide détecté dans l’image. Cette stratégie permet :

- de réduire l’impact des occultations partielles ;
- d’assurer une continuité de mesure même lorsque certains marqueurs sortent du champ de la caméra ;
- d’améliorer la robustesse globale du système sans augmenter la complexité du calcul.

Cette calibration géométrique garantit que toutes les rotations estimées pour un segment sont exprimées dans un référentiel cohérent, condition indispensable au calcul correct des angles articulaires.

7 Calcul des angles articulaires

Une fois les orientations des segments du bras leader estimées par vision et exprimées dans un référentiel cohérent, l’étape suivante consiste à calculer les angles articulaires correspondants. Ces angles constituent les consignes directes envoyées au bras robotisé follower.

L’approche retenue repose sur une formulation matricielle, qui permet d’extraire proprement les rotations relatives entre segments adjacents, sans recourir à une cinématique inverse complète.

7.1 Rotations absolues des segments

Pour chaque segment du bras leader (base, membre 1, membre 2, etc.), une matrice de rotation absolue $R_{\text{cam} \rightarrow \text{seg}}$ est obtenue à partir de la vision, après application des matrices de correction géométrique associées aux faces des marqueurs.

Ces matrices décrivent l’orientation de chaque segment dans le repère de la caméra, indépendamment des autres segments.

7.2 Calcul des rotations relatives

Les articulations du bras correspondent à des rotations relatives entre deux segments successifs. La rotation relative associée à une articulation est calculée par la relation matricielle suivante :

$$R_{\text{rel}} = R_{\text{parent}}^T \cdot R_{\text{enfant}}$$

où R_{parent} et R_{enfant} sont les matrices de rotation absolues des segments adjacents. Cette opération permet d'annuler l'orientation globale du bras et d'isoler uniquement la rotation propre à l'articulation.

Cette formulation est particulièrement adaptée au bras SO-101, dont la structure cinématique est sérielle et dont les axes de rotation sont bien définis.

7.3 Extraction des angles de commande

La matrice de rotation relative est ensuite convertie en angles d'Euler. Selon la nature mécanique de l'articulation considérée, seule la composante pertinente est extraite. Par exemple, la rotation de la base correspond principalement à une rotation autour de l'axe vertical (yaw), tandis que les articulations intermédiaires sont dominées par des rotations de type pitch.

Cette sélection permet d'obtenir un angle scalaire directement compatible avec la commande des servomoteurs du bras robotisé.

7.4 Calibration zéro et offsets

Afin d'assurer une correspondance correcte entre les positions du bras leader et celles du bras follower, une procédure de calibration zéro est mise en place. Lors de cette phase, la configuration actuelle du bras leader est enregistrée comme référence, et un offset est associé à chaque articulation.

Les angles de commande sont alors calculés selon la relation :

$$\theta_{\text{cmd}} = \theta_{\text{mes}} - \theta_{\text{offset}}$$

Cette étape permet de compenser les imprécisions mécaniques, les différences d'assemblage et les éventuels désalignements initiaux entre les deux bras.

7.5 Stabilité et perspectives

Le calcul des angles repose sur des estimations instantanées issues de la vision. En l'absence de filtrage temporel, de légères fluctuations peuvent apparaître, en particulier lors de mouvements rapides ou en présence de bruit visuel.

Une amélioration naturelle du système consisterait à intégrer un filtrage temporel (moyenne glissante, filtre exponentiel ou filtre de Kalman) afin de lisser les angles avant leur transmission au bras robotisé et d'améliorer la fluidité du mouvement reproduit.

8 Communication réseau et commande du bras robotisé

Une fois les angles articulaires calculés à partir du bras leader, ils doivent être transmis de manière fiable au bras robotisé afin de reproduire le mouvement en temps réel. Cette étape repose sur une architecture client–serveur simple, basée sur une communication TCP, suivie d'une commande directe des moteurs via la librairie *LeRobot*.

8.1 Architecture client–serveur

Le système est organisé selon une architecture réseau claire :

- le **serveur** est intégré à l'application principale de vision et de calcul (C++ / Qt) ;
- le **client** est exécuté côté bras robotisé et se charge de recevoir les données de commande.

La communication s'effectue via une connexion TCP persistante, garantissant l'ordre et l'intégrité des données transmises, ce qui est essentiel pour une commande articulaire cohérente.

8.2 Format des messages

Les données échangées sont encapsulées dans une structure binaire compacte, conçue pour limiter la bande passante et la latence. Chaque message contient :

- une clé de sécurité (entier 32 bits) permettant de valider l'origine du message ;
- un ensemble d'octets représentant les angles articulaires encodés.

La présence de la clé de sécurité permet d'ignorer immédiatement tout paquet invalide ou corrompu, renforçant la robustesse du système face à des connexions indésirables ou des erreurs réseau.

8.3 Envoi des commandes côté serveur

Côté serveur, les angles calculés sont convertis en valeurs numériques compatibles avec le protocole de communication, puis insérés dans la structure de message. Le message est ensuite diffusé à l'ensemble des clients connectés via des sockets TCP.

Cette approche permet :

- une transmission synchrone des commandes ;
- la possibilité d'ajouter plusieurs clients sans modifier la logique principale ;
- un découplage clair entre le calcul des angles et leur exploitation.

8.4 Réception et décodage côté client

Côté client, un processus de réception asynchrone est utilisé afin de ne pas bloquer l'exécution principale. Les octets reçus sont accumulés dans un tampon jusqu'à reconstitution complète d'un message.

Une fois le message décodé :

- la clé de sécurité est vérifiée ;
- les valeurs d'angles sont extraites ;
- les données sont converties dans une forme exploitable par la couche de commande moteur.

Cette étape garantit que seules des commandes valides sont transmises au bras robotisé.

8.5 Commande des moteurs avec LeRobot

La commande effective du bras follower s'appuie sur la librairie open-source *LeRobot*, conçue pour piloter les bras SO-101. Les angles reçus sont traduits en consignes articulaires correspondant aux moteurs de chaque articulation.

L'utilisation de *LeRobot* permet :

- une abstraction du bas niveau matériel des servomoteurs ;
- une correspondance directe entre angles théoriques et positions moteur ;
- une intégration rapide et fiable du bras robotisé dans le système global.

8.6 Contraintes temporelles et limites

La chaîne complète (vision, calcul, transmission, commande) introduit une latence non nulle. Bien que compatible avec un pilotage quasi temps réel, cette latence peut devenir perceptible lors de mouvements rapides.

Des améliorations futures pourraient inclure :

- une réduction de la taille des messages ;
- un lissage des commandes côté client ;
- une synchronisation temporelle plus fine entre acquisition et commande.

Malgré ces limites, l'architecture actuelle permet une reproduction fidèle et stable des mouvements du bras leader par le bras robotisé.

9 Résultats expérimentaux et démonstrations

Cette section présente les résultats obtenus lors des phases de test du système EchoBot, ainsi que les démonstrations réalisées pour valider le fonctionnement global de la chaîne : vision, calcul géométrique, communication réseau et commande du bras robotisé.

9.1 Conditions expérimentales

Les expérimentations ont été menées dans un environnement de laboratoire, avec :

- une caméra RGB fixe positionnée face au bras leader ;
- un bras SO-101 leader manipulé manuellement par un opérateur ;
- un bras SO-101 follower motorisé, piloté à distance ;
- une connexion réseau locale entre le serveur de calcul et le client de commande.

Les marqueurs ArUco étaient disposés sur les segments du bras leader de manière à garantir une visibilité suffisante dans la majorité des configurations usuelles.

9.2 Validation de la détection et de l'estimation de pose

Les premiers tests ont consisté à valider la détection fiable des marqueurs ArUco et l'estimation de leur orientation. Dans des conditions d'éclairage standard, la détection s'est révélée stable pour des mouvements lents à modérés du bras leader.

Les angles d'Euler calculés à partir des matrices de rotation ont été affichés en temps réel sur l'interface graphique, superposés à l'image de la caméra. Cette visualisation a permis de vérifier qualitativement :

- la cohérence des axes de rotation ;
- la continuité des angles lors de mouvements progressifs ;
- l'impact des occultations temporaires de marqueurs.

9.3 Reproduction des mouvements par le bras robotisé

Une fois la chaîne complète activée, les angles articulaires calculés ont été transmis au bras follower via la communication TCP. Les démonstrations ont montré que le bras robotisé est capable de reproduire les mouvements principaux du bras leader :

- rotation de la base ;
- élévation et abaissement des segments intermédiaires ;
- mouvements coordonnés multi-articulations.

Pour des mouvements lents et continus, la correspondance entre les deux bras est jugée satisfaisante visuellement. L'opérateur perçoit clairement une relation directe entre le mouvement imposé au mannequin et celui du robot.

9.4 Latence et comportement dynamique

Une latence globale est observable entre le mouvement du bras leader et la réponse du bras follower. Cette latence provient de l'enchaînement des étapes :

- acquisition et traitement de l'image ;
- estimation de pose ;
- calcul des angles ;
- transmission réseau ;
- commande des moteurs.

Bien que cette latence reste compatible avec une démonstration fonctionnelle, elle devient perceptible lors de mouvements rapides ou brusques. Dans ces situations, le bras robotisé peut présenter un léger retard ou des oscillations transitoires.

9.5 Limites observées

Les expérimentations ont permis d'identifier plusieurs limitations :

- perte temporaire de suivi lors d'occultations prolongées des marqueurs ;
- bruit sur les angles estimés lors de mouvements rapides ;
- absence de filtrage temporel des commandes moteur ;
- dépendance à une calibration géométrique précise des marqueurs.

Ces limites n'empêchent pas la démonstration du concept, mais constituent des points d'amélioration clairs pour une version ultérieure du système.

9.6 Démonstration du concept EchoBot

Malgré les limitations identifiées, les tests réalisés valident le principe fondamental du projet EchoBot : un opérateur humain peut guider intuitivement un bras robotisé à distance à l'aide d'un mannequin passif et d'une simple caméra.

Le système démontre la faisabilité d'une approche de téléopération visuelle sans capteurs embarqués complexes sur le bras leader, ouvrant la voie à des applications en robotique collaborative, en prototypage rapide ou en enseignement.

10 Discussion et perspectives

Le projet EchoBot a permis de valider un démonstrateur fonctionnel de téléopération robotique basé sur la vision par ordinateur et un bras mannequin passif. Les résultats obtenus mettent en évidence à la fois la pertinence de l'approche choisie et certaines limites inhérentes aux choix techniques effectués.

10.1 Analyse critique des choix techniques

Le recours à des marqueurs ArUco pour l'estimation de pose s'est révélé pertinent dans un contexte de prototypage rapide. Cette solution offre un bon compromis entre simplicité d'implémentation, robustesse et performances en temps réel. Toutefois, elle reste sensible aux occultations prolongées et aux mouvements rapides, ce qui peut dégrader temporairement la qualité des estimations angulaires.

L'absence de capteurs embarqués sur le bras leader constitue un avantage en termes de coût et de simplicité, mais reporte l'intégralité de la mesure sur la chaîne de vision. Cette dépendance unique à la caméra impose des contraintes fortes sur le positionnement de celle-ci et sur les conditions d'éclairage.

Le calcul des angles articulaires à partir de rotations relatives s'est montré efficace et cohérent avec la cinématique du bras SO-101. L'approche matricielle adoptée permet une extraction claire des degrés de liberté pertinents, sans recourir à une cinématique inverse complète.

10.2 Limites actuelles du système

Plusieurs limitations ont été identifiées lors des phases de test :

- absence de filtrage temporel des angles, entraînant un léger bruit dans les commandes moteur ;
- latence perceptible lors de mouvements rapides, liée à la chaîne complète vision-calcul-réseau-commande ;
- dépendance à une calibration géométrique précise des marqueurs ;
- absence de gestion prédictive ou d'anticipation des mouvements.

Ces limites n'empêchent pas la démonstration du concept, mais réduisent la précision et la fluidité du pilotage dans des conditions dynamiques.

10.3 Axes d'amélioration

Plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées :

- intégration d'un filtrage temporel des angles (filtre exponentiel ou filtre de Kalman) afin de lisser les commandes ;
- amélioration de la robustesse face aux occultations par fusion multi-marqueurs ou suivi temporel ;
- optimisation du protocole de communication pour réduire la latence ;

- ajout d'un retour d'état du bras follower vers le système de vision ;
- extension du système à une configuration multi-caméras.

À plus long terme, l'intégration de techniques d'apprentissage (imitation learning) pourrait permettre d'exploiter EchoBot comme outil d'acquisition de démonstrations pour l'apprentissage de tâches robotiques.

10.4 Applications potentielles

Le concept EchoBot s'inscrit naturellement dans plusieurs domaines :

- robotique collaborative en environnement industriel ;
- téléopération en milieu contraint ou sécurisé ;
- prototypage rapide de trajectoires robotiques ;
- enseignement et démonstration de concepts de robotique.

Ces perspectives confirment l'intérêt du projet au-delà du simple cadre académique.

11 Conclusion générale

Le projet EchoBot avait pour objectif de concevoir un système permettant de piloter un bras robotisé à partir des mouvements d'un bras mannequin passif, en s'appuyant uniquement sur la vision par ordinateur et une architecture logicielle modulaire.

Les travaux réalisés ont permis de mettre en œuvre une chaîne complète et fonctionnelle, allant de l'acquisition visuelle des marqueurs ArUco jusqu'à la commande effective des moteurs du bras robotisé. L'estimation de pose, la calibration géométrique des référentiels, le calcul des angles articulaires et la communication réseau ont été intégrés de manière cohérente dans un système opérationnel.

Les démonstrations expérimentales valident le principe fondamental du projet : un opérateur humain peut guider intuitivement un robot à distance, sans programmation explicite, en manipulant un mannequin passif. Cette approche se distingue par sa simplicité matérielle et sa flexibilité, tout en restant compatible avec des applications de robotique collaborative.

Bien que certaines limites aient été identifiées, notamment en termes de latence et de bruit des mesures, elles constituent des axes d'amélioration clairs plutôt que des verrous technologiques. Le projet EchoBot pose ainsi des bases solides pour des développements futurs, tant sur le plan de la robustesse que sur celui de l'intelligence du système.