

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES



DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Automatique

Spécialité : Automatique

THÈME

**Systeme de Vision Stéréoscopique pour la
Robotique Industrielle**

Préparé par : Si Merabet Moulay Touhami

Rebai Tayeb

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Mr.LARBI M'hamed	MCA	Président
Mr. HASSAINE Said	MCA	Examineur
Mr.AddaBenattia Abderrahmane	MAA	Encadreur



Dédicaces

Ce travail modeste est dédié :

*À nos parents Qu'ils trouvent en nous la source de leur fierté à qui nous devons tout ; et plus particulièrement, à tous nos proches des familles **SI***

***MERABET** et **REBAI**, à tous nos chers amis et nos camarades de*

l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret ; Et à tous ce qui nous ont enseigné

au long de notre vie scolaire.

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions le tout puissant ALLAH, notre créateur de nous avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

*Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur **Mr. Adda Benatia Abderrahmane**, pour ses conseils et sa disponibilité du début à la fin de ce travail, ainsi qu'à l'ensemble des professeurs qui ont contribué à notre formation.*

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles qui nous ont soutenues moralement de loin ou de près, toutes les personnes qui ont participé à ces recherches et à l'élaboration de ce mémoire. Ainsi, nos proches et nos amis, qui nous ont accompagnés, aidés, soutenus et encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre I : Types de camera utilisées dans robotique industrielle	
I-1 Introduction	3
I-2 Les systèmes de vision industrielle	3
I-2.1 Définition	3
I-2.2 Domaines d'application	4
I-3 Les différents types de vision	5
I-3.1 La vision 2D	5
I-3.2 La vision 3D	5
I-3.3 La vision thermique	6
I-3.4 La vision rayon X	6
I-4 Caméra intelligente.....	7
I-4.1 Utilisation	7
I-4.2 Caractéristiques techniques	7
I-4.3 Applications typiques	8
I-5 La vision monoculaire	8
I-5.1 Historique	8
I-5.2 Modélisation de l'image	11
I-6 Les systèmes d'acquisition(Stéréovision).....	15
I-6.1 La stéréovision.....	15
I-6.2 La vision stéréoscopique naturelle	15
I-6.3 Vision stéréoscopique artificielle	16
I-6.4 Le matériel.....	18

I-6.5 La méthode	18
I-6.5.1 Méthode de base	18
I-6.5.2 Applications et précision	19
I-7 Techniques de calibrage de la caméra	19
I-8.1 Conclusion	19

Chapitre II : Calibration de Camera

II-1. Introduction	21
II-2. Les systèmes d'acquisition	21
II-2.1 L'objectif	22
II-2.1.1 Objectif à focale fixe	22
II-2.1.2 Objectif grand angle	22
II-2.1.3 Téléobjectif	22
II-2.1.4 Objectif à miroirs ou catadioptrique	23
II-2.1.5 Objectif macro	23
II-2.1.6 Objectif à focale variable	23
II-2.1.7 Objectif fish-eye	23
II-2.2 La caméra	24
II-2.2.1 Capteur CCD (Charge Coupled Device)	24
II-2.2.2 Capteur CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)	24
II-2.3 La carte d'acquisition	25
II-3 Méthode des moindres carrés	25
II-3.1 La droite des moindres carrés	26
II-4 Modèle de caméra linéaire (modèle sténopé)	27
II-4.1 Paramètres extrinsèques (externes)	28
II-4.1.1 Rotations	29
II-4.1.2 Translations	30
II-4.1.3 Matrice homogène	30
II-4.2 Paramètres intrinsèques (internes)	31
II-5 Calibration de la caméra	32
II-5.1 Restitution des coordonnées objets	35
II-5.2 Système de stéréovision	36
II-5.3 Calcul de la position par stéréovision	37

II-6 Conclusion	38
-----------------------	----

Chapitre III : Expérimentation

III-1 Calibration d'une caméra par la Méthode des Moindres carrées	40
III-2 Logiciel	40
III-2.1 Présentation du logiciel Matlab	40
III-2.2 Pourquoi Matlab.....	40
III-3 Matérielles	41
III-3.1 Présentation du matériel.....	41
III-3.2 La mire	42
III-3.3 La Table	42
III-3 Acquisition des images et résultats d'extraction.....	43
III-4 Déroulement de la manipulation.....	44
III-5 Conclusion	55
Conclusion générale	56
Bibliographie.....	57
Résumé	

Liste des abréviations

OCR	Optical Character recognition
2D	Deux Dimensions
3D	Trois Dimensions
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
VGA	Video Graphics Array
SVGA	Super Video Graphics Array
E/S	Entrée/Sortie
USB	Universal Serial Bus
IP	Internet Protocol
MCO	Miscellaneous Charges Order
CD	Caméra Droite
CG	Caméra Gauche
BMP	Bitmap Image file
JPG	Joint Photographic Group
MGI	Modèle Géométrique Inverse

Liste des figures

Figure I.1. La projection d'une caméra matricielle et linéaire.....	5
Figure I.2. Interface utilisateur 4 photos de caméra : ligne complète de scellage, robot guidé par caméra.....	6
Figure I.3. Location caméra thermique pour Maintenance industrielle	6
Figure I.4. Le modèle de sténopé	8
Figure I.5. Le principe d'acquisition des images	9
Figure I.6. Les modèles de lentille convergente	10
Figure I.7. Capteurs d'image.....	11
Figure I.8. Le fonctionnement d'une caméra	11
Figure I.9. Plan image de la lentille	12
Figure I.10. Le principe du plan image de la lentille	13
Figure I.11. Le repère de l'image pixelique	14
Figure I.12. Les systèmes d'acquisition	15
Figure I.12. Position des yeux des herbivores.....	16
Figure I.13. Précaution pour séparer les champs de vue avec la main.....	17
Figure I.14. Dessins d'un octaèdre en perspective montrant deux vues différentes.....	17
Figure I.15. Stéréoscope à miroirs	18
Figure II.1. Le fonctionnement d'un capteur photo numérique.....	21
Figure II.2. Objectif de caméra	22
Figure II.3. Téléobjectif	22
Figure II.4. Objectif macro	23

Figure II.5. Objectif à focale variable	23
Figure II.6. Photo prise avec un objectif fish-eye	23
Figure II.7. Capteur CCD et capteur CMOS	24
Figure II.8. Carte d'acquisition, webcam et caméra IP	25
Figure II.9 : Illustration de la méthode des moindres carrés	26
Figure II.10 différents plan associés à une caméra	27
Figure II.11. Changement de repère et projection perspective (sténopé)	28
Figure II.12 Paramètres intrinsèques	31
Figure II.13 Détermination de la position d'un point par stéréovision	37
Figure III.1 : les deux webcams de la stéréovision	42
Figure III.2 : un damier de dimensions : 300 x 300 mm	42
Figure III.3 : la table de calibration de deux caméras de la stéréovision	43
Figure III.4. Eléments pour la calibration	44
Figure III.5. Réalisation de la tâche de calibration	46
Figure III.6. Validation du modèle de la caméra sur image avec objets	48
Figure III.7. Réalisation de la tâche de calibration de deux caméras	50
Figure III.8. Validation du modèle de deux caméras sur deux images (gauche, droite) avec deux objets	54

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Tableau de correspondance de la Différence entre capteur CCD et capteur COMS	25
Tableau III.1 : Images acquises par la caméra	43

Introduction générale

De ses cinq sens, celui que l'homme utilise le plus est la vision. Elle lui fournit une quantité importante d'informations qui lui permettent d'interagir avec son environnement. Grâce à elle, la personne est capable d'identifier les objets situés dans son champ visuel, leurs dimensions, leurs couleurs, leurs formes

D'une manière similaire, la vision artificielle vise à permettre à des systèmes automatiques, informatiques ou robotiques, d'acquérir et de traiter des informations visuelles, en s'affranchissant au maximum des capacités visuelles d'un opérateur humain. En cela, elle diffère de l'imagerie, qui utilise aussi des images, mais qui laisse les opérations de traitement de haut niveau et d'interprétation à un opérateur humain.

L'utilisation des systèmes de vision dans le domaine de la robotique fournit une grande richesse des informations qui sont exploitées pour réaliser une variété des tâches. Vu les progrès technologiques, les applications utilisant le guidage visuel des robots deviennent de plus en plus nombreuses.

Le calibrage de caméra est l'un des problèmes classiques dans la vision artificielle où plusieurs tâches nécessitent le calcul exact de l'information métrique à partir de l'image.

Calibrer une caméra consiste à déterminer la transformation qui relie des points de la scène 3D, à leurs correspondants 2D du plan image. Cette transformation dépend de deux types de paramètres :

1. Les paramètres extrinsèques : qui définissent la pose de la caméra c'est-à-dire ; sa position et son orientation dans l'espace exprimées dans un repère lié à la scène.
2. Les paramètres intrinsèques : qui décrivent la géométrie interne de la caméra c'est-à-dire le processus de formation d'image à travers le système optique et électronique.

Afin de déterminer la géométrie externe d'une caméra, on doit estimer la transformation rigide 3D qui relie le système de référence 3D associé à la caméra avec le système de référence 3D associé à la scène observée. Cette transformation a six degrés de liberté : les trois composantes de translation et les trois angles de rotation.

Ces paramètres permettent de passer des coordonnées 3D universelles en coordonnées 2D image. L'opération inverse, par application de la géométrie projective, permet de localiser (position) des formes 3D.

Le modèle de la caméra choisi est le modèle sténopé (projection perspective), ainsi nous pouvons estimer le modèle de la caméra et cela par l'application de la méthode des moindres carrés ; cependant, les calculs se font avec le logiciel MATLAB.

*Chapitre I - Types de
camera utilisées dans
robotique industrielle*

I-1 Introduction

On définit la vision industrielle comme étant l'application de la vision assistée par ordinateur aux domaines industriels de production et de recherche.

Les domaines d'applications de la vision dans le monde industriel sont très nombreux et variés. Elle peut être utilisée dans la production de masse à haute cadence, le souci constant d'amélioration de la Qualité et la recherche de gain économique ce qui pousse de plus en plus les industriels à automatiser les moyens de production.

La vision industrielle est une réponse à ces préoccupations pour les opérations de contrôles de la production. En effet les machines de vision industrielle permettent un contrôle de la production à haute cadence et assurent une bonne répétabilité du contrôle, à la différence d'un opérateur, une machine n'est jamais fatiguée et ses critères de décisions ne varient pas.

La vision industrielle peut aussi être utilisée pour gérer des flux d'objets important. Par exemple la lecture optique d'un code à barres ou d'une adresse postale sur un colis pour l'orienter dans un centre de tri. Ou encore le tri de pommes par couleurs différentes avant emballage.

Enfin la vision industrielle peut être un moyen de guidage pour un système mobile autonome (comme un robot) lorsque ses mouvements ne peuvent pas être déterminés par avance comme, par exemple, la préhension d'objets sur un tapis roulant. Une caméra est alors embarquée sur la tête du robot et permet le positionnement de celui-ci au point désiré.

I-2 Les systèmes de vision industrielle

I-2.1 Définition

Typiquement la vision industrielle consiste à prendre une ou plusieurs images de l'objet à contrôler ou visualiser, ensuite les images sont numérisées pour être utilisables par un logiciel de traitement d'image le plus souvent dédié au contrôle considéré. Le traitement de l'image ayant été réalisé une décision est prise par rapport à des critères prédéfinis et une action est effectuée.[1]

Description : La vision Industrielle est une technique de contrôle, mesure ou détection sans contact et non destructive, utilisée principalement sur les chaines de fabrication industrielle. Elle permet de contrôler ou obtenir des données techniques sur les pièces pendant leur

Chapitre I Types de camera utilisées dans robotique industrielle

fabrication dans le but de les exploiter automatiquement en terme de conformité, tri, qualité, détection de défauts, positionnement / préhension par une unité robotisée ou plus simplement dans un but statistique. Les matériels utilisés sont généralement des caméras industrielles, des objectifs, éclairages, câbles, cartes d'acquisition, unité centrale et logiciel de traitement d'image.

I-2.2 Domaines d'application

Les productions de masse à haute cadence, le souci constant d'amélioration de la Qualité et la recherche de gain économique poussent de plus en plus les industriels à automatiser les moyens de production. [2]

La vision industrielle est une réponse à ces préoccupations pour les opérations de contrôles de la production. En effet les machines de vision industrielle permettent un contrôle de la production à haute cadence et assurent une bonne répétabilité du contrôle (à la différence d'un opérateur, une machine n'est jamais fatiguée et ses critères de décision ne varient pas).

La vision industrielle peut aussi être utilisée pour gérer des flux d'objets. Par exemple la lecture optique d'un code à barres ou d'une adresse postale sur un colis pour l'orienter dans un centre de tri. Ou encore le tri de pommes par couleurs différentes avant emballage.

Enfin la vision industrielle peut être un moyen de guidage pour un système mobile autonome (comme un robot) lorsque ses mouvements ne peuvent pas être déterminés par avance comme la préhension d'objets sur un tapis roulant. Une caméra est alors embarquée sur la tête du robot et permet le positionnement de celui-ci au point désiré.

D'autres applications typiques, à savoir

- La mesure dimensionnelle
- Le contrôle d'assemblage
- La mesure de position (x, y et angle)
- Le guidage de robot
- Le contrôle de qualité d'impression
- La lecture de texte (OCR)
- La lecture de code (barre, data matrix, ...)

Dans ce sens, ayant constaté l'absence du capuchon sur un stylo, ce dernier est éjecté de la chaîne et subira une opération différente des stylos ayant leur capuchon.

I-3 Les différents types de vision

I-3.1 La vision 2D

C'est ce que l'on pourrait appeler la vision 'classique'. La vision dans un plan est la plus répandue et la mieux maîtrisée sur le marché aujourd'hui. On peut trouver des caméras 2D en niveaux de gris ou en couleur. Ces caméras peuvent être linéaires ou matricielle.

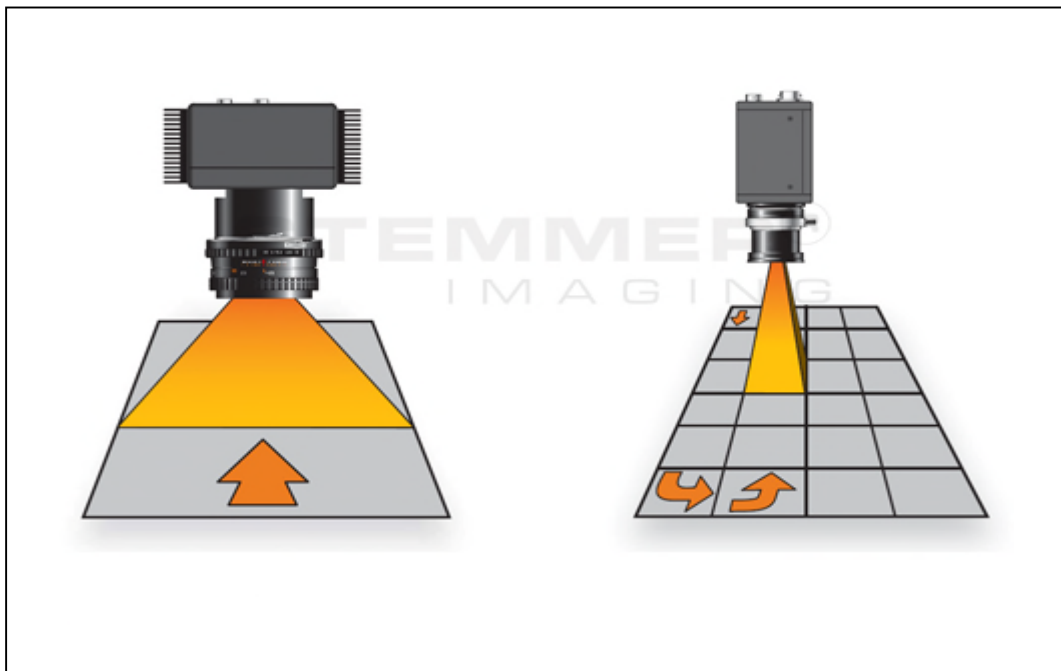


Figure I.1. La projection d'une caméra matricielle et linéaire

I-3.2 La vision 3D

La vision en trois dimensions est une technique en plein développement technologique et en plein essor. Le principe peut être résumé de façon simpliste comme suit. Un faisceau laser (rouge le plus souvent) est projeté sur l'objet à contrôler, une caméra matricielle placée à environ 45° par rapport au plan (laser ; objet) prend une photo de la trace laser sur l'objet. Des calculs géométriques basés sur le principe de triangulation permettent, en étudiant la courbure de la trace laser, de modéliser l'objet considéré en 3D.[6] Cette technique peut aussi être réalisée en projetant une série de franges sur l'objet. Le problème alors est que l'objet ne doit pas être trop absorbant (couleur sombre) car les franges ne sont alors plus visibles en lumière blanche.



Figure I.2. Interface utilisateur 4 photos de caméra : ligne complète de scellage, robot guidé par caméra

I-3.3 La vision thermique

Une caméra thermique enregistre les différents rayonnements infrarouge (ondes de chaleur) émis par les corps et qui varient en fonction de leur température. Contrairement à l'imaginaire populaire, une caméra thermique ne permet pas de voir derrière une paroi ou un obstacle. Elle reproduit la chaleur emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière.



Figure I.3. Location caméra thermique pour Maintenance industrielle

I-3.4 La vision rayon X

Est un système de radiographie numérique, conçu et développé pour répondre aux industriels et laboratoires à leurs besoins d'analyse et de diagnostic non destructif à l'aide d'un outil simple d'utilisation et performant.

I-4 Caméra intelligente :

Une caméra Intelligente est un système de vision (Vision industrielle) qui capture des images avec un traitement permettant de les interpréter, c'est à dire extraire de l'information utile pour faire des actions .

Description :

Une caméra intelligente est comme son nom l'indique une caméra dans laquelle est ajoutée une électronique permettant d'acquérir et de stocker des images mais aussi de traiter de l'information (traitement d'image) et de communiquer avec les systèmes environnants (réseau, automates, opérateurs ...).

I-4.1 Utilisation :

Dans l'industrie, là où les PC sont souvent perçus comme des systèmes extérieurs difficiles à intégrer, les caméras intelligentes peuvent être vues globalement comme des capteurs s'intégrant facilement dans les processus de contrôle automatisés. En outre, celles-ci présentent l'avantage d'être compactes et de ne pas nécessiter la présence de multiples périphériques d'interface pas toujours nécessaires.

Pour des applications nécessitant plusieurs captures asynchrones, elles sont la plupart du temps mieux adaptées qu'un système PC. Pour des applications très complexes, elles sont parfois utilisées avec d'autres caméras au sein d'un système PC.

I-4.2 Caractéristiques techniques :

Les caméras intelligentes se caractérisent par :

- ✓ Le type de capteur CCD/ CMOS - NB/Col – taille – type de shutter ...
- ✓ Les performances du processeur
- ✓ La taille de la mémoire (image, programme et data)
- ✓ Le type de monture pour l'objectif.
- ✓ Les interfaces E/S, Bus terrain, Réseau
- ✓ Possibilités d'affichage VGA, SVGA, Giga-Ethernet
- ✓ Le ou les logiciels disponibles

Chapitre I Types de camera utilisées dans robotique industrielle

I-4.3 Applications typiques :

Les applications sont pratiquement aussi nombreuses qu'il existe de produits à contrôler. Toutefois, plusieurs applications que l'on peut qualifier de standard ont prouvées leur efficacité.

Contrôle de conformité (nombres d'éléments et leurs positions) :

- ✓ Mesures sans contact.
- ✓ Identification et tri.
- ✓ Lecture et vérification de marquage (caractères, code barre, data matrix).
- ✓ Contrôles de processus continu (extrusion de plastique, vérification de tissu ou de soudure).
- ✓ Commande robot (détection de position et d'orientation 2D et 3D).
- ✓ Contrôles de mouvements et de déplacements (vidéo surveillance).
- ✓ Contrôles biométriques.

De nos jours, la majorité des fabricants de caméras industrielles proposent aussi des caméras intelligentes.

I-5 La vision monoculaire

I-5.1 Historique

En traitement de l'image il est essentiel de bien connaître le principe d'acquisition des images. Pour cela nous allons utiliser une modélisation de caméra dite modèle de caméra **pin-hole** ou **sténopé** dans la littérature française. C'est un modèle de géométrie perspective très simple[3] dont le principe a décrit en premier à l'Antiquité par Aristote ayant percé un trou dans un mur d'une pièce sombre afin d'obtenir une image renversée de tous les objets placés devant cet orifice à l'extérieur.

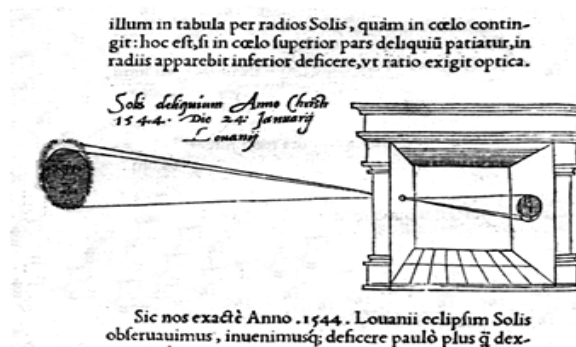


Figure I.4. Le principe a décrit en premier à l'Antiquité par Aristote ayant percé un trou dans un mur.

Chapitre I Types de camera utilisées dans robotique industrielle

Jusqu'au XVIème siècle le modèle de sténopé n'évolue guère, cependant à ce siècle il y a une utilisation grandissante de cette technique. En utilisant le modèle de sténopé, ils possèdent le « pouvoir de recopier » à l'identique le monde réel sur une peinture afin de lui donner un caractère réaliste. On peut dire que c'est à partir de cette époque que l'envie de photographier le monde va émerger.

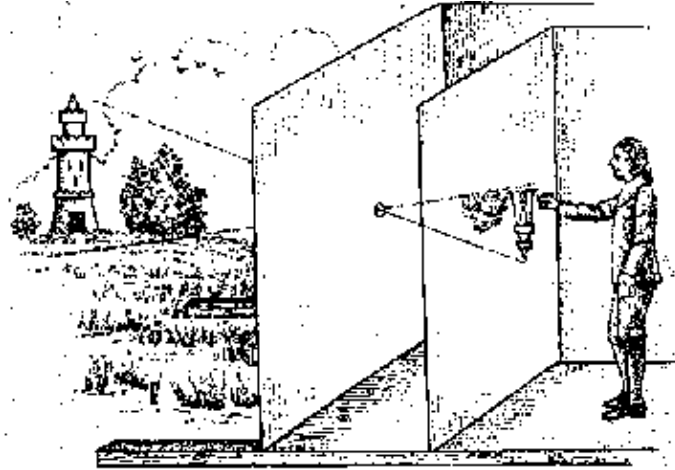


Figure I.5. Jérôme Cardan ajoute une lentille convergente derrière le petit trou.

En 1540, Jérôme Cardan, mathématicien, philosophe et médecin italien, ajoute une lentille convergente derrière le petit trou : c'est une révolution. La **lentille** permet de donner une image parfaitement nette de l'objet, mais également d'agrandir le trou pour laisser passer plus de lumière sans perdre de la netteté. Un miroir incliné à 45° permet de rediriger la lumière afin de la projeter sur une table par exemple, facilitant le travail de calquage des artistes. L'utilisation d'une lentille en plus du trou fera que l'on appellera cet ensemble une caméra obscura.

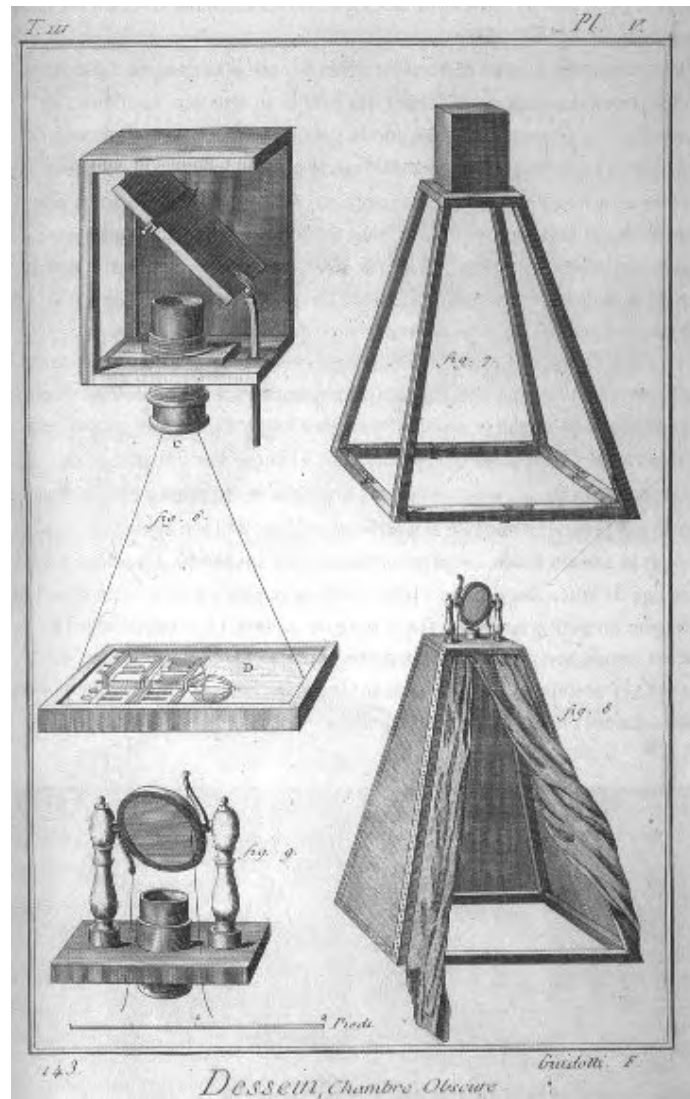


Figure I.6. Les principes de bases qui vont servir par la suite à créer des modèles plus complexes.

Nous avons ici les principes de bases qui vont servir par la suite à créer des modèles plus complexes que sont nos caméras actuelles :

- Le sténopé qui sera remplacé par un diaphragme permettant de régler la quantité de lumière reçue et de régler la profondeur de champ.
- Une lentille qui sera remplacée par un assemblage complexe de lentilles qui permettent de régler la mise au point, de corriger les aberrations chromatiques et géométriques que comporte une lentille mince seule.
- Un plan image sur lequel nous avons actuellement un réseau de capteurs qui capturent l'image pour la récupérer sous format numérique.

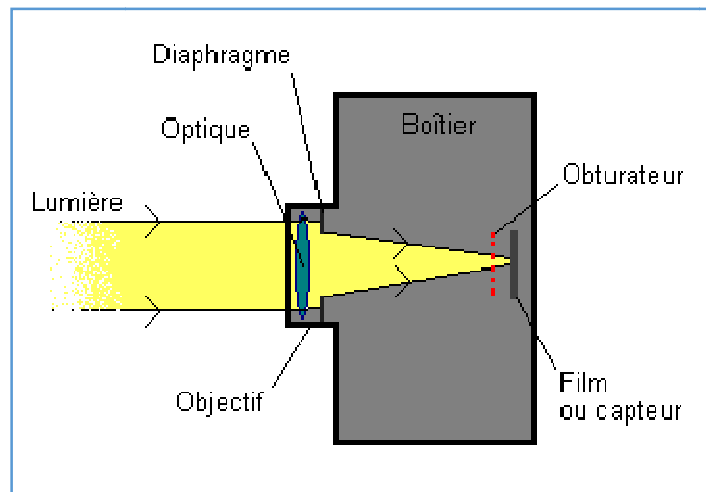


Figure I.7. Lentilles qui permettent de régler la mise au point

I-5.2 Modélisation de l'image

Ayant vu l'histoire et l'évolution de la caméra au cours du temps, nous pouvons maintenant nous intéresser à une meilleure compréhension scientifique de son fonctionnement (des notions en optique des lentilles minces sont nécessaires pour une meilleure assimilation de la théorie.[4])

On peut synthétiser le fonctionnement d'une caméra par le schéma suivant :

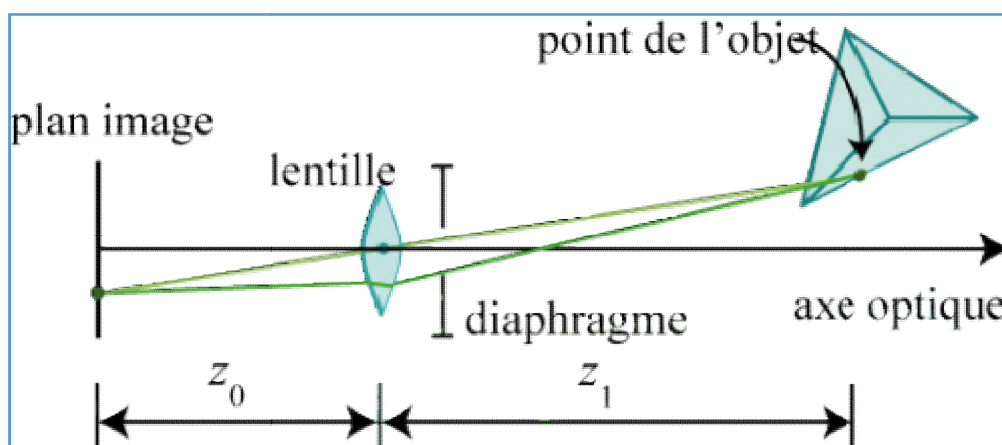


Figure I.8. Fonctionnement d'une caméra par le schéma.

Pour rappel l'équation d'une lentille mince est :

$$1/f = 1/z_0 + 1/z_1$$

Avec f la focale de la lentille (ou focale équivalente de l'objectif).

Chapitre I Types de camera utilisées dans robotique industrielle

Pour notre utilisation, nous avons fait une mise au point à l'infini (∞), nous souhaitons qu'un objet lointain apparaisse nette sur notre capteur. On a alors $Z_1 \gg Z_0$, on peut donc approximer $Z_0 = |f|$ d'après l'équation des lentilles minces. Physiquement cela signifie que notre plan image doit se trouver à une distance f du centre optique de la lentille.

Cette configuration particulière permet de plus d'avoir une profondeur de champ importante, ne dépendant peu de l'ouverture du diaphragme. C'est-à-dire que même un objet relativement proche de la caméra apparaîtra comme net car Z_0 sera pas très éloigné de f .

Si l'on récapitule on peut établir ce modèle :

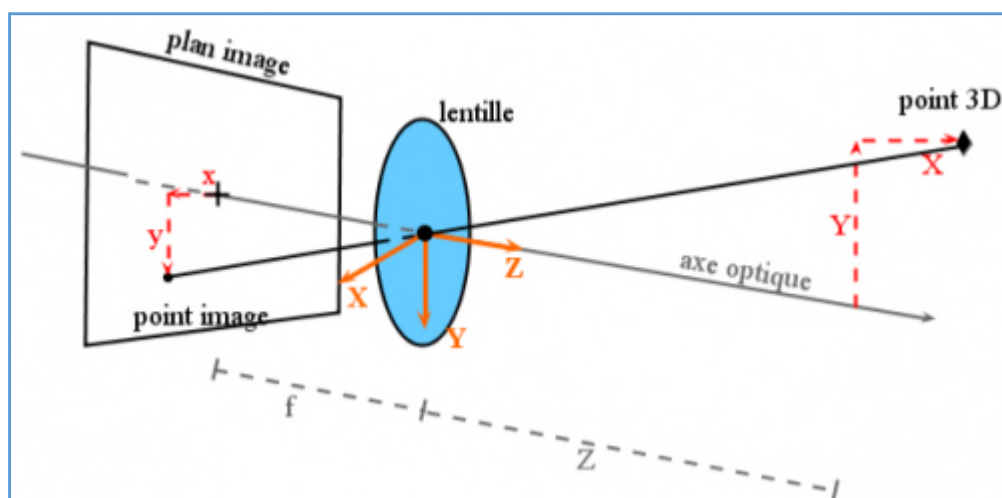


Figure I.9. Faire passer le plan image "devant" le centre optique.

Grâce au théorème de Thalès on en déduit : $\frac{f}{z} = -\frac{x}{X} = -\frac{y}{Y}$

Soit les équations de projection suivantes : $y = -f \frac{Y}{Z}$; $x = -f \frac{X}{Z}$ (1.1)

Maintenant nous allons procéder à une petite astuce, qui ne change rien au résultat mais qui va nous permettre de mieux manipuler les résultats. Comme nous l'avons vu, nos axes des y et des x sont inversés par rapport à ce que l'on observe, c'est pourquoi nous allons modifier légèrement le modèle afin de faire passer le plan image "devant" le centre optique. Bien entendu, cette manipulation est physiquement impossible à réaliser, mais d'un point de vue mathématique c'est possible. Nous avons alors :

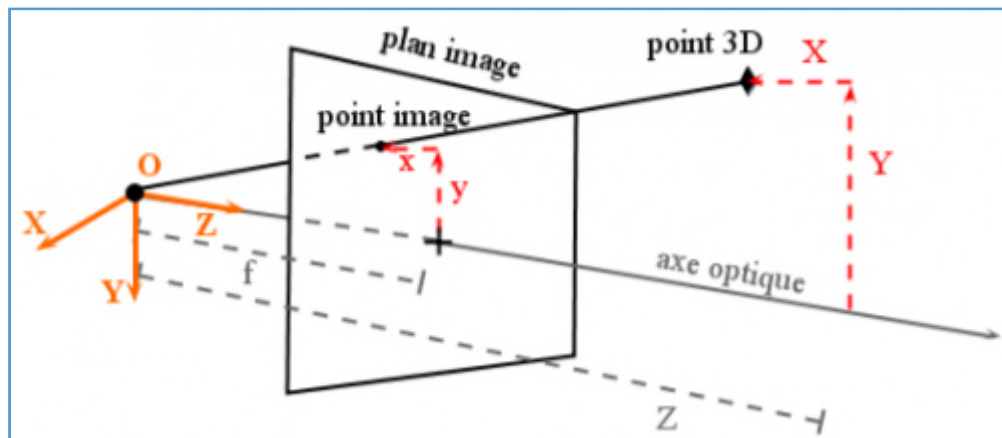


Figure I.10. Un point de l'espace est projeté sur un plan image.

Et donc les nouvelles équations de projection : $y = f \frac{Y}{Z}$; $x = f \frac{X}{Z}$

Nous venons de voir comment un point de l'espace est projeté sur un plan image, or cette projection de la 3D à la 2D nous fait perdre une information, celle de profondeur. En effet êtes-vous en mesure de me dire précisément à quelle distance se trouve un objet que vous pouvez voir sur une photo ? La réponse je la connais déjà, c'est non.

A partir de maintenant il faut bien vous mettre à l'esprit que ce que nous apercevons sur une photo, c'est un "rayon lumineux" et non un point 3D. En effet la seule chose que nous pouvons savoir c'est que ce point se trouve forcément quelque part sur la droite passant par le centre optique et le point, mais nous ne pouvons dire où exactement. Nous allons donc faire appel à une notion que l'on appelle coordonnées homogènes et qui représente justement l'information que le point est quelque part sur cette droite. Une coordonnée homogène ne représente ni plus ni moins que le vecteur directeur de cette droite.

Il reste encore un petit changement de repère à effectuer, car nous avons calculer la position x , y par rapport au centre optique, or le centre optique ne coïncide pas au centre du repère de l'image pixelique dont nous faisons l'acquisition. Il faut établir la position du centre optique ($\mathbf{U0}$, $\mathbf{V0}$) par rapport au repère (\mathbf{U} , \mathbf{V}) de l'image. Nous allons aussi intégrer un terme α (en mètre par pixel) représentant la largeur d'un pixel dans un système métrique. En effet un pixel représente un capteur, qui possède une taille finie (sur nos caméras un pixel fait 3,4 μm de large et de hauteur). Cependant toutes les caméras ne possèdent pas des capteurs parfaits, et selon la technologie les capteurs peuvent être plus larges que hauts, donc nous allons dissocier $\alpha_x(x)$ et $\alpha_y(y)$.

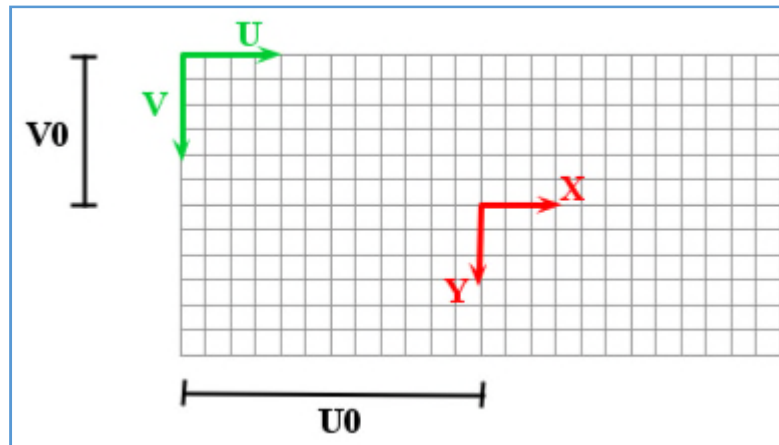


Figure I.11 Plan image, (u, v) Point 2D de l'image pixel.

Nous avons alors :

$$U = \alpha_x \cdot X + U_0 \quad (1.2)$$

$$V = \alpha_y \cdot Y + V_0$$

Nous allons à partir d'ici commencer à écrire tous nos calculs sous forme vectorielle afin de faciliter la représentation des calculs. La matrice est aussi simple que les formules du dessus. Par convention voici la liste des symboles que je vais utiliser :

$Q=(X, Y, Z)$	Point 3D de l'espace
f	Distance focale physique en m
$q=(x, y, w)$	Point homogène
$P=(u, v)$	Point 2D de l'image pixel
M	Matrice des paramètres intrinsèques
α_x, α_y	Taille pixel en mètre selon x et y

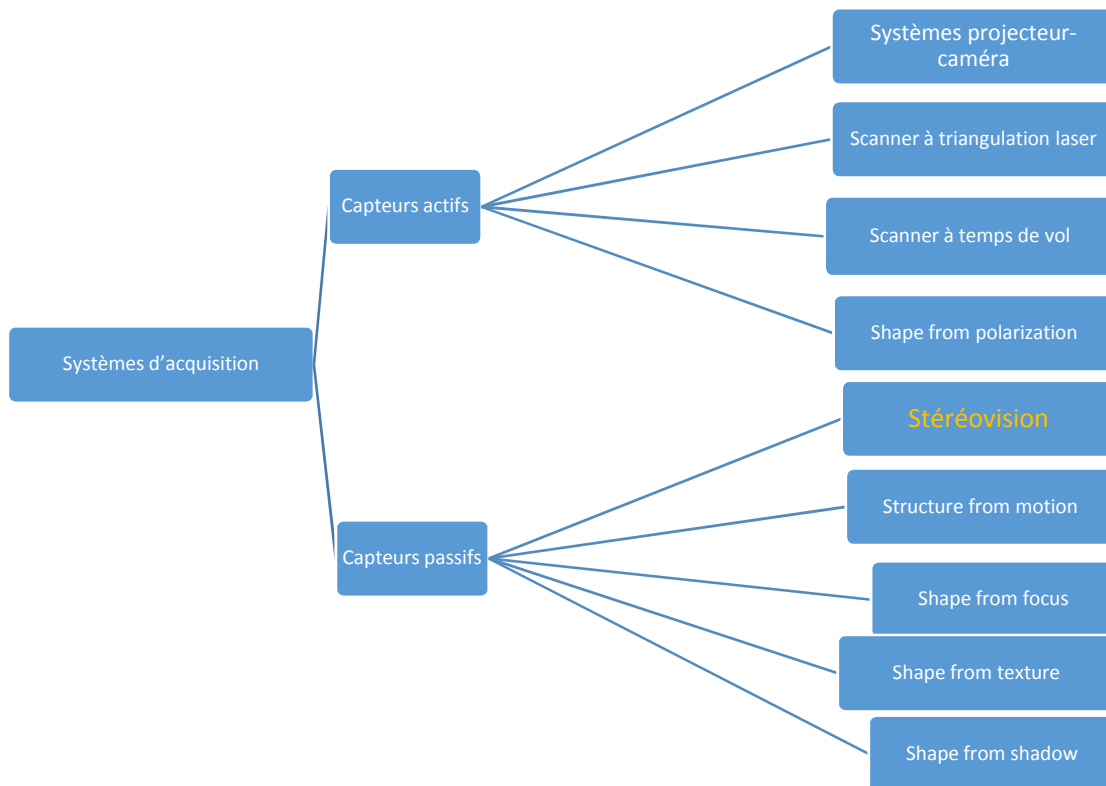
On introduit la matrice intrinsèque M ainsi que les calculs en points pixels :

$$M = \begin{bmatrix} f \cdot \alpha_x & 0 & U_0 \\ 0 & f \cdot \alpha_y & V_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fx & 0 & U_0 \\ 0 & fy & V_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$q = Q \cdot M \quad (1.4)$$

$$p = \begin{bmatrix} x & y \\ w & w \end{bmatrix}' \quad (1.2)$$

I-6 Les systèmes d'acquisition (Stéréovision)



I-6.1 La stéréovision

La **stéréovision** ou **mesure stéréoscopique** est une méthode de mesure qui consiste à se servir de la prise d'images (photographiques ou numériques) prises de différents points de vue, pour déterminer les dimensions, les formes ou les positions d'objets.

I-6.2 La vision stéréoscopique naturelle

L'homme dispose de deux yeux qui lui permettent de percevoir son environnement de deux points de vue légèrement différents. La fusion mentale de ces deux vues permet d'engendrer une image spatiale de notre environnement, un processus purement psychologique. [5] La perception spatiale représente une aptitude typique d'un chasseur, d'un carnivore. Par contre, les yeux des herbivores (cheval, bovidés), sont déplacés latéralement afin de permettre un angle de vision beaucoup plus étendu, ce qui est notamment utile pour détecter des prédateurs arrivant par derrière. Dans ce cas-là, le faible recouvrement des deux champs de vision ne permet guère la perception de la profondeur.

Chapitre I Types de camera utilisées dans robotique industrielle

La vision stéréoscopique est une aptitude naturelle chez l'homme et part de ses sens comme par exemple aussi le sens de palper qui permet également de reconnaître l'environnement de manière spatiale. Cependant, le faible écartement des yeux ne permet une vision spatiale que pour notre environnement proche à moins qu'on essaie d'agrandir cette base de manière artificielle comme pour les jumelles ou les télescopes d'artillerie.



Figure I.12 Position des yeux des herbivores (latérale avec champ de vision de 360°) et des carnivores (sur le front, avec écartement pour permettre la vision stéréoscopique)

I-6.3 Vision stéréoscopique artificielle

Une autre possibilité de voir stéréoscopiquement consiste à présenter aux deux yeux deux images prises de 2 points de vue différents (dessins ou prises de vues photographiques de différents points de vue). L'octaèdre de la **Figure I.14** a été dessiné en perspective correcte à partir 2 points de vue différents et peut être observé stéréoscopiquement. Cependant, il faut veiller à ce que l'image gauche ne soit vue que de l'œil gauche et l'image droite que de l'œil droit.

Comme les deux figures sont espacées d'une distance correspondant à la base des yeux, il est important de les observer avec les axes oculaires parallèles (!) et évidemment d'une distance assez courte, environ 25 cm. Du point de vue physiologique, la convergence des axes oculaires est cependant rigoureusement liée à la distance de focalisation et contrer ce réflexe exige un certain effort. Le moyen le plus simple de voir cette figure en relief est de séparer les deux images en mettant la main entre les deux yeux et de décontracter les yeux afin d'arriver à un parallélisme des axes oculaires (cf. **Figure I.13**).

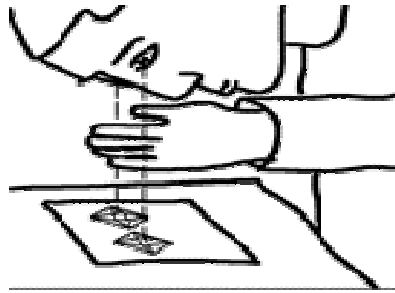


Figure I.13 précaution pour séparer les champs de vue avec la main, afin de faciliter la vision stéréoscopique de l'octaèdre ci-dessous

(cf. **Figure I.14**)

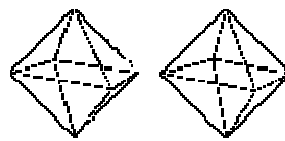


Figure I.14 dessins d'un octaèdre en perspective montrant deux vues différentes permettant une observation stéréoscopique

Le stéréoscope représente le dispositif optimal pour l'observation d'images photographiques (cf. **Figure I.15**). Au moyen de deux systèmes optiques, on regarde les deux images en veillant que les yeux soient focalisés à l'infini. La base des yeux peut être agrandie par des prismes ou des miroirs afin de permettre aussi l'observation d'images de grand format. De bonnes images transparentes supportent un agrandissement optique jusqu'à 20 fois. D'autre part, un bon stéréoscope offre un champ de vision par exemple jusqu'à 7 cm et même plus lors d'un agrandissement de 3 fois. Il est entendu que des images peuvent aussi être affichées sur un moniteur stéréo ; cependant, il faut dans ce cas-là compter avec une certaine réduction de qualité et il faut surtout veiller à une large séparation optique des deux images homologues.

La figure suivante montre un stéréoscope à miroirs permettant la vision de deux images photographiques jusqu'à la dimension 23 x 23 cm (format standard des photographies aériennes). Le système optique permet d'agrandir les images en focalisant à l'infini ; il offre des conditions optimales pour la vision stéréoscopique des photos : bonne qualité optique, séparation complète des deux images partielles, bon confort pour l'observateur après une brève adaptation.

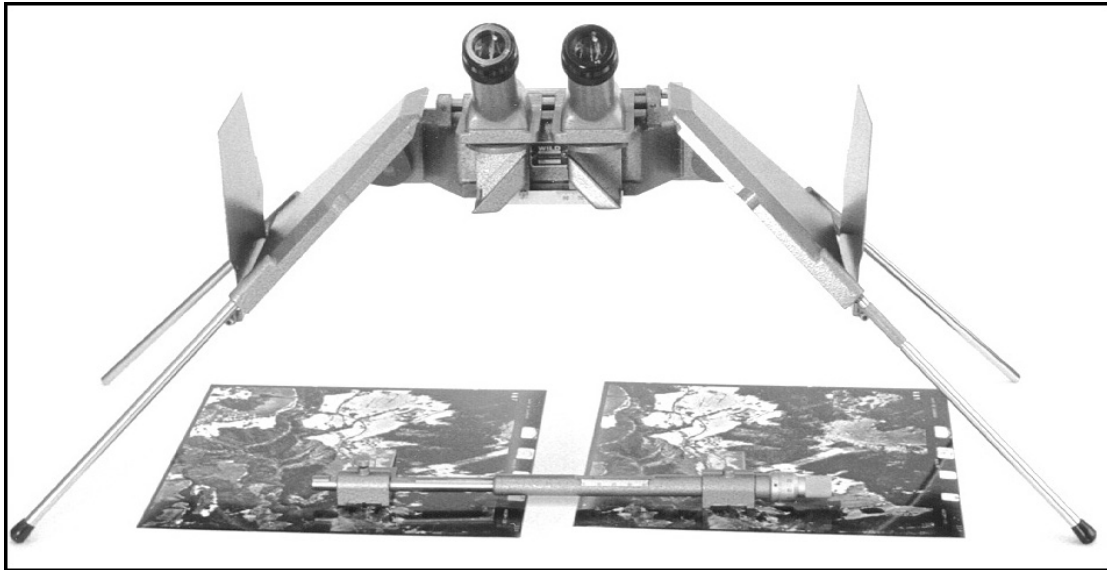


Figure I.15 stéréoscope à miroirs

I-6.4 Le matériel :

Des appareils photographiques étalonnés utilisant des films argentiques plans et stables dimensionnellement ou des détecteurs C.C.D à haute résolution pour des mesures statiques ;

Ces appareils sont souvent appelés « chambres métriques ». Ils sont équipés d'objectifs de grande qualité, à faible distorsion, de pouvoir résolvant élevé. Le tirage (distance entre l'objectif et la surface sensible) est fixe après étalonnage. Si des objectifs de moindre qualité sont utilisés, il est nécessaire de corriger leurs distorsions par étalonnage.

I-6.5 La méthode :

I-6.5.1 Méthode de base :

Pour effectuer la mesure, il faut réaliser l'acquisition d'au moins deux images de l'objet à mesurer de deux points de vue différents.

Après avoir enregistré deux prises de vue de deux points de vue différents d'un objet, les coordonnées images (couple stéréoscopique) des points à mesurer sur chacune des prises de vue sont déterminées sur chacune des images. La mise en concordance est généralement faite automatiquement.

Pour déterminer l'échelle (les dimensions de la pièce), il est nécessaire d'étalonner le système de mesure. Les positions relatives des systèmes de prise de vue sont fixes.

I-6.5.2 Applications et précision

D'autres domaines d'activité importants sont représentés par la robotique, les mesures industrielles et la médecine. Dans ces domaines, la photogrammétrie se trouve en concurrence avec les mesures géodésiques, les mesures de distance par laser ou aussi les procédés de moiré.

I-7 Techniques de calibrage de la caméra

Le calibrage de caméras est un sujet vaste dont les origines remontent au début du 20e siècle (Clarke et Fryer, 1998). On voulait alors améliorer la précision des cartes géographiques dessinées à partir de photos. De nos jours, l'objectif du calibrage n'a pas changé. On désire toujours décrire l'environnement à partir d'images avec de plus en plus de précision.

Toutes les méthodes de calibrage tentent de faire un compromis entre la complexité du modèle de la caméra et la facilité à en déterminer les paramètres. En effet, plus le modèle utilisé est complexe, plus il a de chances de représenter fidèlement la caméra physique. Toutefois, avec l'augmentation du nombre de paramètres à déterminer, les équations deviennent plus élaborées et on se retrouve avec des problèmes d'instabilité numérique et de minimums locaux dans les algorithmes d'optimisation. On doit donc trouver un modèle qui représente suffisamment bien la réalité tout en demeurant simple.

I-8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté La vision Industrielle telle que La vision Industrielle est une technique de contrôle, mesure ou détection. Elle permet de contrôler ou obtenir des données techniques, dans le but de les exploiter automatiquement en terme de conformité, tri, qualité, détection de défauts, positionnement / préhension par une unité robotisée, et ce chapitre présente un état de l'art sur les modèles de caméras. Le modèle du sténopé est détaillé.

Dans le chapitre suivant, Il s'agit de valider des connaissances sur la méthode de calibrage tentent de faire un compromis entre la complexité du modèle de la caméra et la facilité à en déterminer les paramètres.

Chapitre **II**

Calibration De Camera

II-1. Introduction

Lorsqu'un opérateur humain contrôle à distance un bras robotique configuré selon une relation spatiale caméra/bras, il a besoin de savoir où se trouve l'objet à manipuler par rapport au robot ou par rapport à la caméra.

Une relation entre les points 3D de la scène et leurs projections dans l'image à partir d'une image 2D passe obligatoirement par l'étape de la calibration de la camera qui réalise la capture en 3D.

Ainsi la calibration d'une caméra permet de caractériser les paramètres intrinsèques et extrinsèques.

Ces paramètres permettent de passer des coordonnées 3D univers en coordonnées 2D image. L'opération inverse, par application de la géométrie projective, permet de localiser (position) des formes 3D.

II-2. Les systèmes d'acquisition

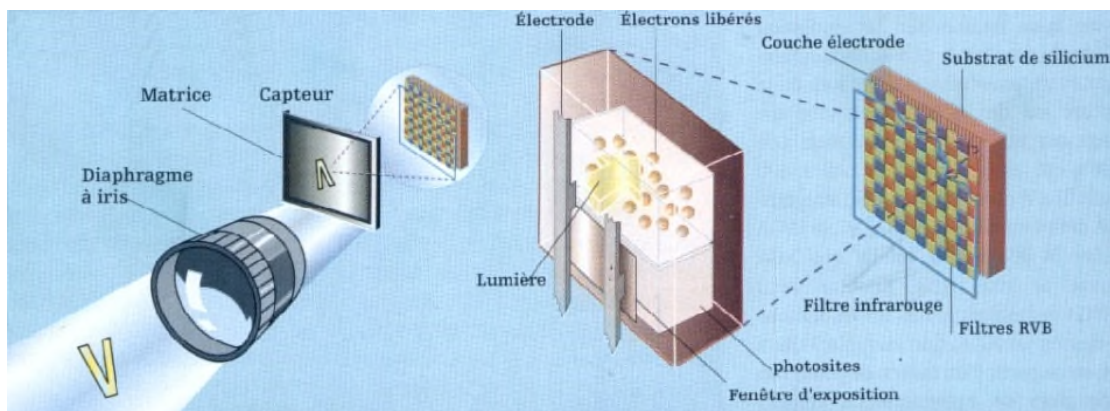


Figure II.1: Le fonctionnement d'un capteur photo numérique

Un système d'acquisition d'image se compose des éléments suivants[1] :

- ❖ Un objectif (optique).
- ❖ Une caméra.
- ❖ Une carte d'acquisition.
- ❖ Un micro-ordinateur.
- ❖ Un module de traitement d'images et éventuellement un moniteur de visualisation d'images.

II-2.1L'objectif

Un objectif est composé d'une ou de plusieurs lentilles. Il forme, à partir d'un objet, son image dont la position et la taille peuvent être calculées selon les lois de l'optique géométrique(Figure II.2) .



Figure II.2:Objectif de caméra.

Il existe une grande variété d'objectifs :

II-2.1.1Objectif à focale fixe

C'est l'objectif le plus simple. Sa formule optique comprend généralement 4 à 8 lentilles. Il est relativement léger et a un bon rapport qualité/prix.

II-2.1.2Objectif grand angle

C'est un objectif de courte focale, couvrant un grand angle de champ. La distance focale d'un grand-angulaire est de 20 à 35 mm.

II-2.1.3Téléobjectif

Il permet d'obtenir une image plus grande. Pour cela, sa longueur focale est de 85 mm et au-delà(Figure II.3).



Figure II.3:Téléobjectif.

II-2.1.4 Objectif à miroirs ou catadioptrique

Les objectifs de très longue focale (500 mm et plus) sont si longs (30-50 cm) et lourds (plusieurs kg) que l'on doit les monter sur un pied.

II-2.1.5 Objectif macro

Cet objectif est calculé pour donner la meilleure image avec un objet placé très près (quelques dizaines de millimètres).

La mise au point fine est effectuée en déplaçant l'ensemble appareil - objectif par rapport à l'objet. Une diminution de la focale intervient généralement de façon simultanée (Figure II.4).



Figure II.4: Objectif macro.

II-2.1.6 Objectif à focale variable

Il est communément nommé zoom. Il s'agit de modifier artificiellement l'angle de prise de vue tout en restant à la même distance de l'objet (Figure II.5).



Figure II.5: Objectif à focale variable.

II-2.1.7 Objectif fish-eye

C'est un objectif spécial, ayant une distance focale très courte et donc un angle de champ très grand, jusqu'à 180° dans la diagonale. Il donne des images déformées (Figure II.6).



Figure II.6 : Photo prise avec un objectif fish-eye.

II-2.2 La caméra

C'est un capteur qui transforme une image optique en un signal vidéo électronique.[2]

Il existe plusieurs types de capteurs, les plus utilisés sont :

II-2.2.1 Capteur CCD (Charge Coupled Device)

Le CCD est un dispositif à couplage de charge. Ce dispositif prend la charge de chaque pixel et la transfère à travers un nombre limité de nœuds de sortie. En passant par ce nœud de sortie, la charge peut être convertie en tension. Elle est ensuite mémorisée puis envoyée comme un signal analogique vers la carte d'acquisition.

II-2.2.2 Capteur CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)

C'est un semi-conducteur métal oxyde complémentaire. Un CMOS permet pour chaque pixel d'avoir sa propre conversion charge-tension. Ils ont également tendance à avoir des amplificateurs, des circuits de correction du bruit ainsi que la numérisation du signal. La sortie d'un capteur CMOS sont des bits numériques.



Figure II.7: capteur CCD et capteur CMOS

Tableau II.1:Tableau de correspondance de la Différence entre capteur CCD et capteur CMOS

Caractéristiques métrologiques	Capteur CCD	Capteur CMOS
Résolution	Comparable	
Taille des pixels	Comparable	
Sensibilité	Elevée	Moyenne
Bruit	Faible	Elevé
Risques de saturation	Elevée	Faible
Rapidité	Grande	Très grande

II-2.3La carte d'acquisition

A la sortie de quelques types de caméras, on obtient un signal vidéo analogique, la carte d'acquisition sert à numériser[3] ce signal afin d'être traité par l'ordinateur. Le processus de numérisation est effectué spatialement (échantillonnage) et en amplitude (quantification).

D'autres types de caméras ne nécessitent pas des cartes d'acquisition, c'est le cas des webcams (branchées à l'aide d'un câble USB) et des caméras IP (branchées par des câbles réseaux) (Figure II.8).

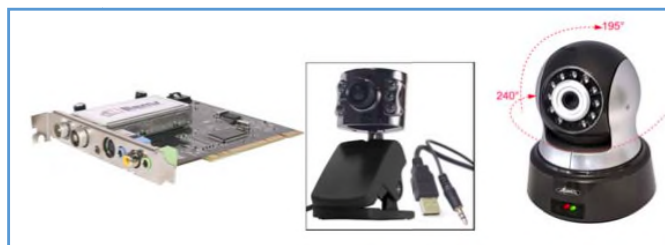


Figure II.8:Carte d'acquisition, webcam et caméra IP.

II-3Méthode des moindres carrés :

La **méthode des moindres carrés**, indépendamment élaborée par Legendre en 1805 et Gauss en 1809, permet de comparer des données expérimentales, généralement entachées d'erreurs de mesure, [4] à un modèle mathématique censé décrire ces données.

Ce modèle peut prendre diverses formes. Il peut s'agir de lois de conservation que les quantités mesurées doivent respecter. La méthode des moindres carrés permet alors de minimiser l'impact des erreurs expérimentales en « ajoutant de l'information » dans le processus de mesure.

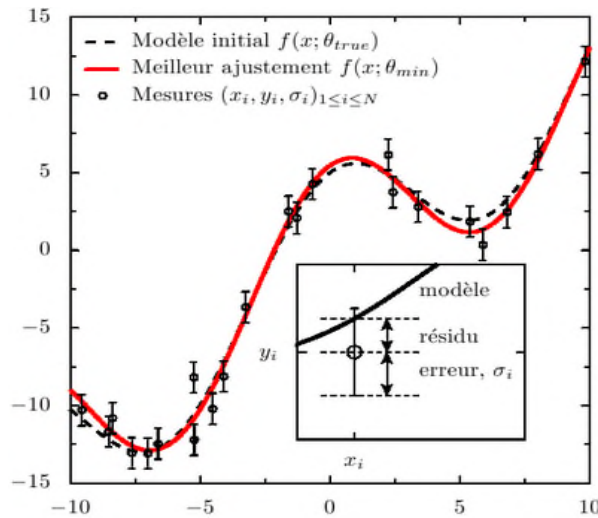


Figure II.9 : Illustration de la méthode des moindres carrés. Les données suivent la courbe figurée en pointillés et sont affectées par un bruit gaussien centré, de variance 1. Le meilleur ajustement déterminé par la méthode des moindres carrés est représenté en rouge.

II-3.1 La droite des moindres carrés

Les données $\{(x_i, y_i), i = 1, \dots, n\}$ peuvent être représentées par un nuage de n points dans le plan (x, y) , le diagramme de dispersion. Le centre de gravité de ce nuage peut se calculer facilement : il s’agit du point de coordonnées.

$$(\bar{x} + \bar{y})^n = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i\right) \tag{2.1}$$

Rechercher une relation affine entre les variables X et Y revient à rechercher une droite qui s’ajuste le mieux possible à ce nuage de points. Parmi toutes les droites possibles, on retient celle qui jouit d’une propriété remarquable : c’est celle qui rend minimale la **somme des carrés des écarts** des valeurs observées y_i au droit $y_i = ax_i + b$. Si ε_i représente cet écart, appelé aussi résidu, le principe des moindres carrés ordinaire (MCO) consiste à choisir les valeurs de a et de b qui minimisent.

$$E = \left(\sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2\right) = \sum_{i=0}^n (y_i - (\alpha x_i + b))^2 \tag{2.1.1}$$

II-4 Modèle de caméra linéaire (modèle sténopé)

Dans la plupart des cas, le modèle choisi est le sténopé car c'est une représentation linéaire de la projection perspective. Son avantage est de simplifier considérablement le calcul, cependant il n'est qu'une approximation.

Le repère univers comme le repère caméra sont composés d'axes orthogonaux deux à deux formant un trièdre. Un point M est défini dans un espace tridimensionnel par ses coordonnées (x_i, y_i, z_i) composantes du vecteur $i OM$ d'indice i du repère choisi ; soit c l'indice du repère caméra et soit w l'indice du repère univers.

Des coordonnées du point M , x est l'abscisse, y est l'ordonnée et z est l'altitude. La modélisation géométrique de la caméra est obtenue par un changement de repère suivi d'une projection perspective conique. Le changement de repère est une notion fondamentale, utilisée en robotique industrielle, qui permet d'exprimer et de voir un même point M dans l'espace par deux (ou plusieurs) repères différents.

L'image d'un objet est obtenue par une projection perspective, c'est la représentation du modèle sténopé qui consiste à simplifier l'ensemble des lentilles que composent le système optique par un point où convergent tous les rayons lumineux pour aller se projeter sur le plan image par des droites sécantes en O origine du repère de la caméra.

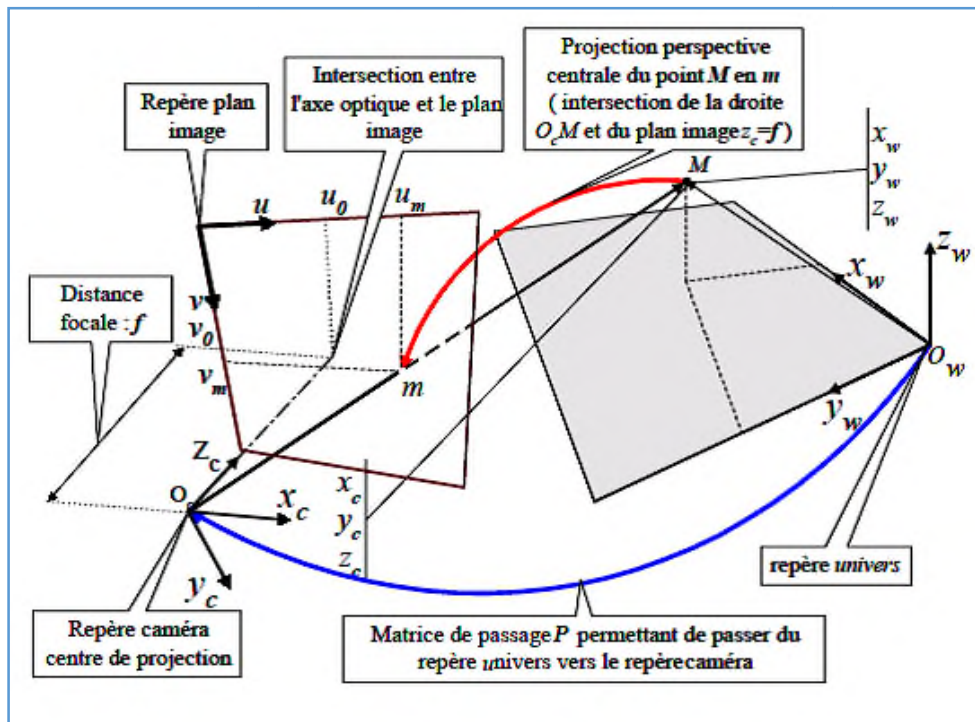


Figure II.10 différents plan associés à une caméra.

Ainsi le point C est défini dans plusieurs repères :

- Le repère univers, où se situe le point C, a pour coordonnées (o_w, x_w, y_w, z_w)
- Le repère caméra, où se situe le point C, a pour coordonnées (o_c, x_c, y_c, z_c)
- Le repère image, où se situe le point c projection du point C, de coordonnées (u_w, v_w) .
- L'axe z_c est l'axe optique de la caméra.

Pour des fins de simplification, on suppose, que l'axe optique (axe z_c) est orthogonal au plan de projection et que le plan image est un parallélogramme. Ce dit plan de projection est situé à une distance f (distance focale) de l'origine o_c , centre de projection, du repère caméra.

L'intersection de l'axe optique avec le plan de projection a pour coordonnées (u_0, v_0) appelées également centre du plan image [5] (\neq du centre de l'image). L'axe optique n'est pas la normale du plan image car il est généré par le système optique. Compte tenu de l'assemblage mécanique de l'objectif et de la caméra par un système de vissage, il existe un jeu nécessaire qui engendre la non perpendicularité de l'axe optique sur le plan image et ne passe pas toujours par le milieu de l'image.

II-4.1 Paramètres extrinsèques (externes)

Le point M est défini par ses coordonnées (x_w, y_w, z_w) dans le repère univers, il est également défini par ses coordonnées (x_c, y_c, z_c) dans le repère Camera .

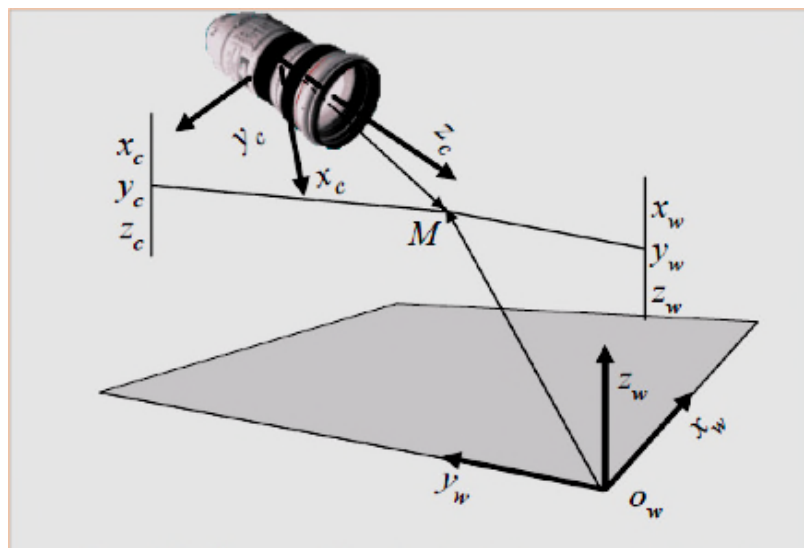


Figure II.11 : Changement de repère et projection perspective (sténopé)

Interviennent dans cette transformation une matrice R de rotation et une matrice T de translation, par la notation homogène suivante :

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ l \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ l \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

P est la matrice de transformation homogène du repère univers vers le repère caméra. P est composée d'une matrice de rotation notée R et d'une matrice de translation notée T . Ainsi trois rotations distinctes forment la matrice de rotation R qui décrivent respectivement le Roulis, le Tangage et le Lacet :

- Rotation autour de l'axe x_c par l'angle α ,
- Rotation autour de l'axe y_c par l'angle β ,
- Rotation autour de l'axe z_c par l'angle γ .

II-4.1.1 Rotations

Un point dans l'espace peut être défini par des coordonnées cartésiennes, cylindriques ou sphériques. En général le système choisi est le système cartésien permettant de désigner une rotation souvent par le Roulis : $0 \leq \alpha \leq 2\pi$, Tangage : $0 \leq \beta \leq 2\pi$, Lacet : $0 \leq \gamma \leq 2\pi$. Les angles de Cardan décrivent assez bien la décomposition d'un mouvement naturel et complet. Quant aux angles d'Euler, ils décrivent des rotations successives (Précession : $0 \leq \phi \leq 2\pi$, Nutation : $0 \leq \theta \leq \pi$, Rotation propre : $0 \leq \psi \leq 2\pi$).

$$R_{(x,\alpha)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \end{bmatrix} R_{(y,\beta)} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$R_{(z,\gamma)} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

La matrice d'orientation est obtenue par la multiplication des trois matrices :

$$R_{(\alpha,\beta,\gamma)} = R_{(z,\gamma)} \cdot R_{(y,\beta)} \cdot R_{(x,\alpha)} \quad (2.4)$$

On obtient par développement :

$$R_{(\alpha,\beta,\gamma)} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma \\ -\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

La matrice de rotation R est une matrice orthogonale. Intuitivement, on peut formuler que quelque soit le type de rotation à faire subir à un trièdre composé d'axes orthogonaux deux à

deux, les axes de ce trièdre resteront orthogonaux deux à deux après la rotation. Donc la matrice de rotation est une matrice orthogonale. On peut alors utiliser la propriété suivante que la matrice inverse est égale à sa transposée.

$$R^{-1} = R^T \quad (2.6)$$

II-4.1.2 Translations

Les translations sont caractérisées par la matrice T qui est représentée sous la forme suivante où chaque coordonnée se voit additionnée ou soustraite d'une valeur numérique :

$$T_{(t_x, t_y, t_z)} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

II-4.1.3 Matrice homogène

La transformation d'une rotation utilisant la matrice de rotation des angles de Cardan et d'une translation peut s'écrire sous la forme homogène suivante :

Soit en notation simplifiée :

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

La matrice P est composée de paramètres extrinsèques issus des 3 rotations et des 3 translations :

$$P = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R] & [T] \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

II-4.2 Paramètres intrinsèques (internes)

En projection perspective, un point M est transformé en son homologue m dans le plan écran par :

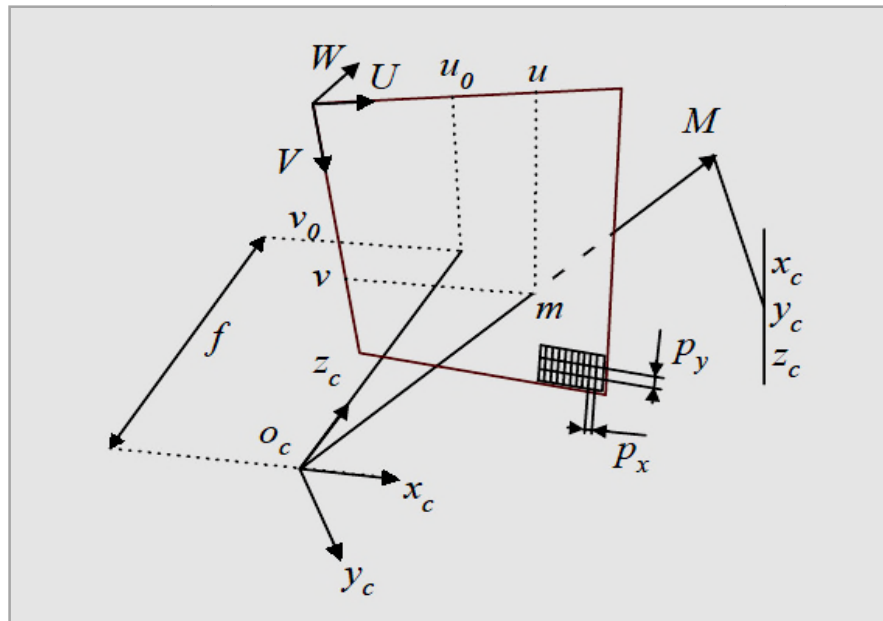


Figure II.12: Paramètres intrinsèques.

La projection perspective d'un point sur le plan image, établie à partir des triangles semblables, a une expression canonique suivante :

$$\begin{cases} u = u_0 + f \cdot \frac{x_c}{p_x + z_c} \\ v = v_0 + f \cdot \frac{y_c}{p_y + z_c} \end{cases} \quad (2.10)$$

Soit en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{p_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{p_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Avec :

$$u = \frac{U}{W} \quad \text{et} \quad v = \frac{V}{W}$$

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{p_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{p_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Ce résultat, très connu, est de la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

La projection perspective s'obtient par les équations canoniques et homogènes suivantes :

$$u = \frac{U}{W} = \frac{c_{11} \cdot x_w + c_{12} \cdot y_w + c_{13} \cdot z_w + c_{14}}{c_{31} \cdot x_w + c_{32} \cdot y_w + c_{33} \cdot z_w + c_{34}} \quad (2.14)$$

$$v = \frac{V}{W} = \frac{c_{21} \cdot x_w + c_{22} \cdot y_w + c_{23} \cdot z_w + c_{24}}{c_{31} \cdot x_w + c_{32} \cdot y_w + c_{33} \cdot z_w + c_{34}}$$

Pour la restitution analytique, il convient que ces deux équations de colinéarité dépendent de 11 coefficients inconnus et nécessitent pour être déterminés, la connaissance des coordonnées de 06 points au moins. Compte tenu du nombre de variables, le système nécessite, au minimum 6 points non coplanaires (pas du même plan) de l'image pour composer un système de 11 équations, le paramètre c_{34} est mis à 1.

II-5 Calibration de la caméra

Utilisant l'équation (2.14) on peut écrire les coordonnées image d'un point $P(X,Y,Z)$ de la scène. On obtient donc :

$$\begin{cases} u = \frac{c_{11} \cdot X + c_{12} \cdot Y + c_{13} \cdot Z + c_{14}}{c_{31} \cdot X + c_{32} \cdot Y + c_{33} \cdot Z + c_{34}} \\ v = \frac{c_{21} \cdot X + c_{22} \cdot Y + c_{23} \cdot Z + c_{24}}{c_{31} \cdot X + c_{32} \cdot Y + c_{33} \cdot Z + c_{34}} \end{cases} \quad (2.15)$$

Notons que ces deux équations décrivent la droite passant par le centre de projection et le point image (u, v) , dans le repère mire, soit la droite passant par Oc et c , Cette droite s'appelle la droite de vue associée avec un point image de coordonnées (u, v) .

Pour évaluer les coefficients de la matrice C, il suffit d'écrire ce système d'équations pour les points de mire (pour lesquels on mesure la projection dans l'image).

Chaque point (X_i, Y_i, Z_i) se projetant en (U_i, V_i) fournit deux équations. Ces équations sont linéaires par rapport aux coefficients de la matrice. Il faut donc au moins 06 points pour déterminer les 11 coefficients de la matrice C qui nous intéresse. Les équations (2.15) peuvent se réécrire comme une combinaison linéaire des C_{IJ} :

$$\begin{cases} X_i \cdot c_{11} + Y_i \cdot c_{12} + Z_i \cdot c_{13} + c_{14} - c_{31} \cdot X_i - c_{32} \cdot Y_i - c_{33} \cdot Z_i = u \cdot c_{34} \\ X_i \cdot c_{21} + Y_i \cdot c_{22} + Z_i \cdot c_{23} + c_{24} - c_{31} \cdot X_i - c_{32} \cdot Y_i - c_{33} \cdot Z_i = v \cdot c_{34} \end{cases} \quad (2.16)$$

On obtient donc 2n équations pour n points et on peut écrire ces équations sous forme matricielle (les indices indiquent la taille des matrices) :

$$A_{2n \times 11} \times C_{11 \times 1} = b_{2n \times 1}$$

Soit plus précisément :

$$\begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u \cdot X_i & -u \cdot Y_i & -u \cdot Z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & -v \cdot X_i & -v \cdot Y_i & -v \cdot Z_i \end{bmatrix} \times [C] = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$[C] = (c_{11} \cdot c_{12} \dots c_{33})^T$$

On suppose que $c_{34}=1$ le zoom.

Le système défini par l'équation (2.16) est un système homogène afin d'obtenir une solution non triviale il faut fixer un des coefficients C_{ij} . On choisit $c_{34}=1$, ce qui revient à diviser tous les coefficients de la matrice par c_{34} et à déterminer les paramètres de la caméra à un facteur près. On peut remarquer que c_{34} n'est autre que la composante en z du vecteur de translation entre le référentiel mire et le référentiel caméra et qu'on peut facilement s'arranger pour que cette composante ne soit pas nulle. Avec ce choix, la solution de l'équation (2.15) peut être obtenue en utilisant la méthode des moindres carrés, donnée par :

$$c = (A^t A)^{-1} A^t \cdot b. \quad (2.18)$$

Faugeras et Toscanifont remarquer deux points. Premièrement, que les coefficients c_{31} , c_{32} , c_{33} ne sont pas influencés par les paramètres intrinsèques. Deuxièmement, que la contrainte d'orthogonalité de la matrice de rotation associée à ces coefficients reste vraie, $c_{31}^2 + c_{32}^2 + c_{33}^2 = 1$; et permet d'extraire, d'un système d'équations non linéaires, les paramètres recherchés, c'est à dire, la distance focale et le centre optique.

Les différents coefficients qui composent la matrice de projection perspective sont :

- $c_{11} = \cos\beta\cos\gamma \cdot \frac{f}{p_x} - \sin\beta \cdot u_0$
- $c_{12} = (\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma) \cdot \frac{f}{p_x} + \sin\alpha\cos\beta \cdot u_0$
- $c_{13} = (\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma) \cdot \frac{f}{p_x} + \cos\alpha\cos\beta \cdot u_0$
- $c_{14} = t_x \cdot \frac{f}{p_x} + t_x \cdot u$
- $c_{21} = \cos\beta\sin\gamma \cdot \frac{f}{p_x} - \sin\beta \cdot v_0$
- $c_{22} = (\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma) \cdot \frac{f}{p_x} + \sin\alpha\cos\beta \cdot v_0$
- $c_{23} = (\cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma) \cdot \frac{f}{p_x} + \cos\alpha\cos\beta \cdot v_0$
- $c_{24} = t_x \cdot \frac{f}{p_x} + t_x \cdot v_0$
- $c_{31} = -\sin\beta$
- $c_{32} = \sin\alpha\cos\beta$
- $c_{33} = \cos\alpha\cos\beta$
- $c_{34} = t_z$

La projection perspective s'obtient par les équations canoniques et homogènes suivantes :

$$\begin{cases} u = \frac{U}{W} = \frac{c_{11} \cdot X + c_{12} \cdot Y + c_{13} \cdot Z + c_{14}}{c_{31} \cdot X + c_{32} \cdot Y + c_{33} \cdot Z + c_{34}} \\ v = \frac{V}{W} = \frac{c_{21} \cdot x_w + c_{22} \cdot y_w + c_{23} \cdot z_w + c_{24}}{c_{31} \cdot x_w + c_{32} \cdot y_w + c_{33} \cdot z_w + c_{34}} \end{cases} \quad (2.19)$$

Pour la restitution analytique, on suggère que "ces deux équations de colinéarité dépendent de 11 coefficients inconnus et nécessitent pour être déterminés, la connaissance des coordonnées de 6 points au moins".

$$\begin{cases} c_{11} \cdot x_w + c_{12} \cdot y_w + c_{13} \cdot z_w + c_{14} - c_{31} \cdot x_w - c_{32} \cdot y_w - c_{33} \cdot z_w = u \cdot c_{34} \\ c_{21} \cdot x_w + c_{22} \cdot y_w + c_{23} \cdot z_w + c_{24} - c_{31} \cdot x_w - c_{32} \cdot y_w - c_{33} \cdot z_w = v \cdot c_{34} \end{cases} \quad (2.20)$$

Compte tenu du nombre de variables, le système nécessite, au minimum 6 points non coplanaires de l'image pour composer un système de 11 équations, le paramètre m_{34} est mis à 1.

II-5.1 Restitution des coordonnées objets

Trois équations linéaires vérifiées en chaque point $P(X, Y, Z)$, sont déduites à partir du système d'équation (2.15) :

$$\begin{cases} C_1 \cdot P - u \cdot C_3 \cdot P = 0 \\ C_2 \cdot P - v \cdot C_3 \cdot P = 0 \\ v \cdot C_2 \cdot P - u \cdot C_1 \cdot P = 0 \end{cases} \quad (2.21)$$

C_i : la ligne d'indice i , de la matrice C

Supposons que la camera est déjà calibrée, donc on connaît la matrice de calibration correspondantes C .

Donc il s'agit de :

Déterminer la position dans l'espace, en se basant sur les coordonnées (u, v)

En détaillant le système d'équation (2.22) on obtient les trois équations suivantes pour la camera :

$$\begin{cases} (c_{11} - u_1 c_{31}) \cdot X + (c_{12} - u_1 c_{32}) \cdot Y + (c_{13} - u_1 c_{33}) \cdot Z + (c_{14} - u_1 c_{34}) = 0 \\ (c_{21} - v_1 c_{31}) \cdot X + (c_{22} - v_1 c_{32}) \cdot Y + (c_{23} - v_1 c_{33}) \cdot Z + (c_{24} - v_1 c_{34}) = 0 \\ (v_1 c_{11} - u_1 c_{21}) \cdot X + (v_1 c_{12} - u_1 c_{22}) \cdot Y + (v_1 c_{13} - u_1 c_{23}) \cdot Z + (v_1 c_{14} - u_1 c_{24}) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} (c_{11} - u c_{31}) \cdot X + (c_{12} - v c_{32}) \cdot Y = u - c_{14} - (c_{13} - u c_{33}) \cdot Z \\ (c_{21} - u c_{31}) \cdot X + (c_{22} - v c_{32}) \cdot Y = v - c_{24} - (c_{23} - v c_{33}) \cdot Z \end{cases}$$

Posant sous forme matricielle le système

$$\begin{bmatrix} (c_{11} - u c_{31}) & (c_{12} - u c_{32}) \\ (c_{21} - v c_{31}) & (c_{22} - v c_{32}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - c_{14} - (c_{13} - u c_{33}) \cdot Z \\ v - c_{24} - (c_{23} - v c_{33}) \cdot Z \end{bmatrix}$$

C'est un système à 02 équations linéaires nous permet de déterminer les 02 coordonnées inconnus (X, Y) du même point P, par la méthode suivante [6] :

$$AX = b \rightarrow X = A^{-1}b \tag{2.25}$$

II-5.2 Système de stéréovision :

Trois équations linéaires vérifiées en chaque point $P(X,Y,Z)$, sont déduites à partir du système d'équations (2.14) et (2.15):

$$\begin{cases} C_1 * P - u * C_3 * P = 0 \\ C_2 * P - v * C_3 * P = 0 \\ v * C_2 * P - u * C_2 * P = 0 \end{cases} \tag{2.26}$$

C_i : la ligne d'indice i, de la matrice C

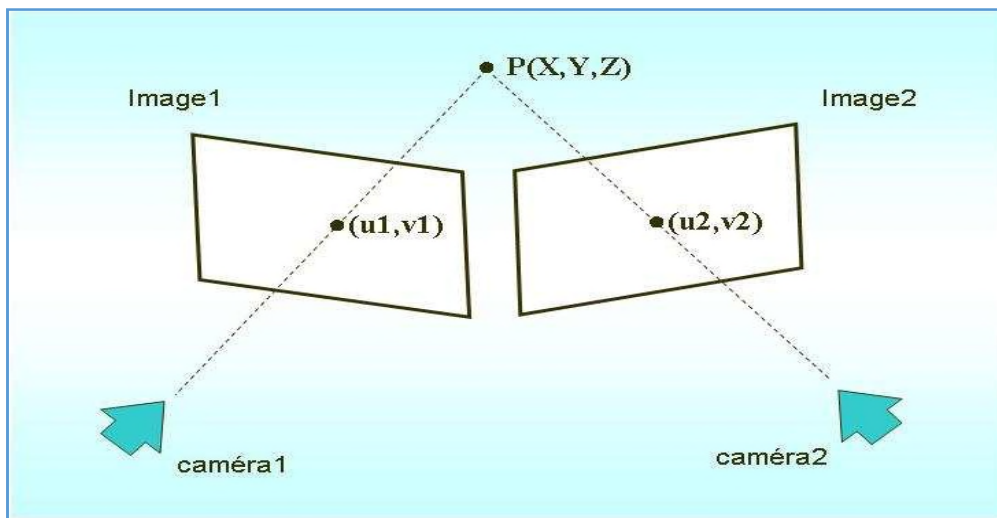


Figure II.13: Détermination de la position d'un point par stéréovision

II-5. 3 Calcul de la position par stéréovision :

Supposant que les deux cameras observent la même scène, donnant deux images. Un même point P apparaît dans les deux images, dans cette partie on donne une méthode pour déterminer la position de P dans l'espace[7], connaissant les coordonnées (u_1, v_1) et (u_2, v_2) des pixels de l'image de P- pour la caméra1 (gauche) et la caméra2 (droite), **Figure II.13**.

Supposons que les deux cameras sont déjà calibrées, donc on connaît les deux matrices de calibration correspondantes C_g et C_d ,

Donc il s'agit de :

- Déterminer la position dans l'espace, en se basant sur les coordonnées (u_1, v_1)

et (u_2, v_2) des pixels de l'image de P pour la camera1 et la camera2.

En détaillant[8] le système d'équation (2.26), on obtient les 03 équations suivantes pour la caméra de gauche CG :

$$\begin{cases} (C_{11}^g - u_1 C_{31}^g) \cdot X + (C_{12}^g - u_1 C_{32}^g) \cdot Y + (C_{13}^g - u_1 C_{33}^g) \cdot Z + (C_{11}^g - u_1 C_{31}^g) = 0 \\ (C_{21}^g - v_1 C_{31}^g) \cdot X + (C_{22}^g - v_1 C_{32}^g) \cdot Y + (C_{23}^g - v_1 C_{33}^g) \cdot Z + (C_{24}^g - v_1 C_{34}^g) = 0 \\ (v_1 C_{11}^g - u_1 C_{21}^g) \cdot X + (v_1 C_{12}^g - u_1 C_{22}^g) \cdot Y + (v_1 C_{13}^g - u_1 C_{23}^g) \cdot Z + (v_1 C_{14}^g - u_1 C_{24}^g) = 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

- De même en écrivant les mêmes équations pour la caméra de droite CD:

$$\begin{cases} (C_{11}^d - u_2 C_{31}^d) \cdot X + (C_{12}^d - u_2 C_{32}^d) \cdot Y + (C_{13}^d - u_2 C_{33}^d) \cdot Z + (C_{11}^d - u_2 C_{31}^d) = 0 \\ (C_{21}^d - v_2 C_{31}^d) \cdot X + (C_{22}^d - v_2 C_{32}^d) \cdot Y + (C_{23}^d - v_2 C_{33}^d) \cdot Z + (C_{24}^d - v_2 C_{34}^d) = 0 \\ (v_2 C_{11}^d - u_2 C_{21}^d) \cdot X + (v_2 C_{12}^d - u_2 C_{22}^d) \cdot Y + (v_2 C_{13}^d - u_2 C_{23}^d) \cdot Z + (v_2 C_{14}^d - u_2 C_{24}^d) = 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

- Finalement, en mettant sous forme matricielle, le système devient :

$$\begin{bmatrix} (C_{11}^g - u_1 C_{31}^g)(C_{12}^g - u_1 C_{32}^g) & (C_{13}^g - u_1 C_{33}^g) \\ (C_{21}^g - v_1 C_{31}^g)(C_{22}^g - v_1 C_{32}^g) & (C_{23}^g - v_1 C_{33}^g) \\ (v_1 C_{11}^g - u_1 C_{21}^g)(v_1 C_{12}^g - u_1 C_{22}^g) & (v_1 C_{13}^g - u_1 C_{23}^g) \\ (C_{11}^d - u_2 C_{31}^d)(C_{12}^d - u_2 C_{32}^d) & (C_{13}^d - u_2 C_{33}^d) \\ (C_{21}^d - v_2 C_{31}^d)(C_{22}^d - v_2 C_{32}^d) & (C_{23}^d - v_2 C_{33}^d) \\ (v_2 C_{11}^d - u_2 C_{21}^d)(v_2 C_{12}^d - u_2 C_{22}^d) & (v_2 C_{13}^d - u_2 C_{23}^d) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(C_{11}^g - u_1 C_{31}^g) \\ -(C_{24}^g - v_1 C_{34}^g) \\ -(v_1 C_{14}^g - u_1 C_{24}^g) \\ -(C_{11}^d - u_2 C_{31}^d) \\ -(C_{24}^d - v_2 C_{34}^d) \\ -(v_2 C_{14}^d - u_2 C_{24}^d) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

C'est un système à 6 équations linéaires nous permet de déterminer les 03 coordonnées inconnus (X, Y, Z) du même point P, par la méthode des moindres carrés (eq(2.25)).

II-6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases et les concepts théoriques et les outils mathématiques nécessaires à la modélisation de la camera. Le modèle de vision pour la caméra permet d'avoir des informations extéroceptives sur la scène, notamment pour l'extraction des coordonnées 3D d'un objet de la scène dont le but est de saisir cet objet.

Dans le chapitre suivant, Il s'agit de valider des connaissances théoriques relatives à la modélisation de la caméra, cette modélisation est indispensable pour fournir des informations extéroceptives sur l'espace réel.

Chapitre III -

Expérimentation :

III-1 Calibration d'une caméra par la Méthode des Moindres carrées

Le but : est de calibrer une caméra par la méthode des moindres carrées. Il s'agit de valider des connaissances théoriques relatives à la modélisation de la caméra, cette modélisation est indispensable pour fournir des informations extéroceptives sur l'espace réel. Dans ce cas, le modèle en question est le modèle sténopé qui caractérise une projection perspective suivant le centre optique de la caméra.

III-2 Logiciel :**III-2.1 Présentation du logiciel Matlab :**

Le logiciel Matlab est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique.

Le logiciel fonctionne sous Windows et sous Linux. Son interface de manipulation HMI utilise les ressources usuelles du multi-fenêtrage. Son apprentissage n'exige que la connaissance de quelques principes de base à partir desquels l'utilisation des fonctions évoluées est très intuitive grâce à l'aide intégrée aux fonctions.

Une alternative à Matlab est Scilab, logiciel libre, dont la version 5 présente de nombreux points communs avec Matlab. De nombreuses entreprises (EDF, ...) ont fait le choix de passer sous Scilab. Le passage d'un logiciel à l'autre n'est cependant pas direct, certaines fonctions ayant des comportements différents (ce ne sont pas des erreurs mais des choix scientifiques différents). Tous les logiciels de calcul réutilisent des savoir-faire scientifiques anciens et éprouvés, développés dans les années 1960.

III-2.2 Pourquoi Matlab ?

Un certain nombre d'opérations sont étendues aux matrices non-carrées comme la résolution de $X = A / B$ solution de $B * X = A$ avec X vecteur qui fait appel à la solution usuelle définie par les moindres -carrés ($X = (A^T A)^{-1} A^T B$).

III-3 Matérielles :

III-3.1 Présentation du matériel

Pour réaliser notre expérimentation, nous avons à notre disposition un objet plan étalon et deux caméras.

Le système d'acquisition d'image : c'est deux webcams de type : Ingen iX-225 dont les caractéristiques sont :

- Capteur d'image : capteur CMOS de haute qualité.
- La résolution photographique 640*480.
- Type d'interface : USB 2.0.
- Fréquence d'image : 30fps/VGA.
- Format de sortie : YUY2/MJPEG.
- Sensibilité minimum : 2.0v / Lux.
- Plage Secfocus : 20mm à extrêmement proche.
- Profondeur de vision : 50mm à l'infini.
- Contrôle du flash : Fréquence 50 Hz.
- Chan Zhen capture des formats de stockage : BMP/JPG.
- Dynamiquement des formats de stockage : AVI.
- Température de travail : -10'C-75'C.
- Consommation : <0.7W.
- L'appareil photo avec microphone.
- Vidéo claire et de haute qualité.
- Optique de classe mondiale.



Figure III.1 : les deux webcams de la stéréovision.

III-3.2 La mire

Pour réaliser ce calibrage, nous avons besoin d'une mire strictement plane. C'est un damier de dimensions : 300 x 300 mm. Les dimensions de chaque carré sont 30mm*30mm. Les coins de chaque carré sont considérés comme points de calibrage.

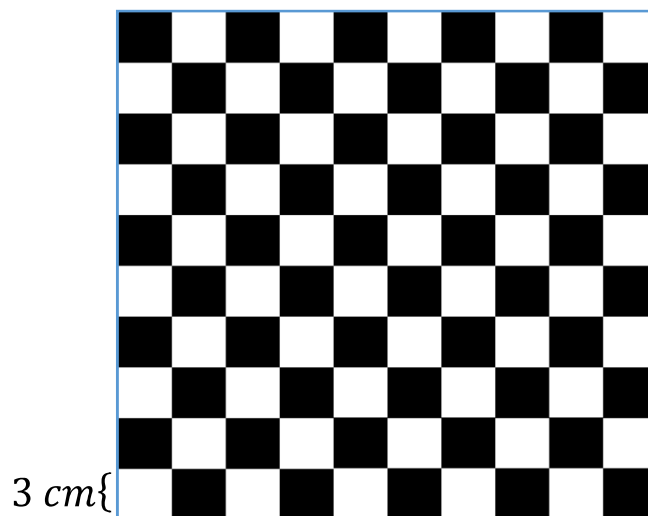


Figure III.2 :un damier de dimensions : 300 x 300 mm.

III-3.3La Table

C'est une table avec une tige de calibrage, pour cela la tige elle fait calibration de deux caméras de la stéréovision pour un Z bien déterminé.

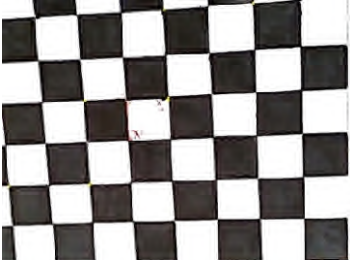





Figure III.3 :la table de calibration de deux caméras de la stéréovision.

III-3 Acquisition des images et résultats d'extraction

Nous avons utilisé quatre images de la mire plane, prises dans différentes orientations. Le tableau (III.1) montre les images acquises avec la webcam classées dans des ensembles.[1]

Tableau III.1:Images acquises par la camera.

Z \ D.G	Droit	Gauche
50 Cm		
70 Cm		

Ce qu'il faut toujours vérifier, c'est de détecter les mêmes coins dans toutes les images sinon le calibrage est erroné.

III-4 Déroulement de la manipulation

Étape 1 : charger et afficher une image bit map (*.bmp)

Récupérer les fichiers :

- Les images de la mire: "camN.bmp", N = la distance mire-caméra (cm)
- Le repère objet sur l'image, unité : 1 carrée = 3cm = 30mm.
- L'interface de calibration : visionner l'image sur PC de l'utilisateur (ms paint).

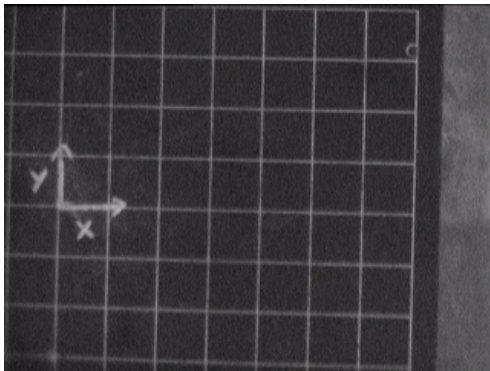
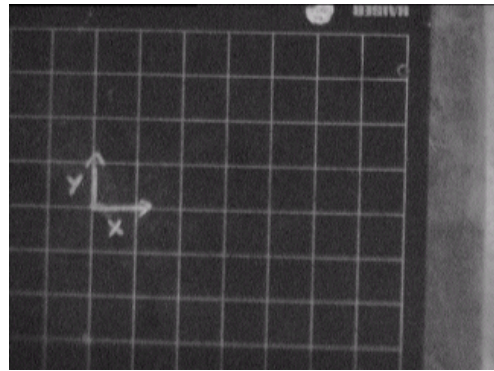
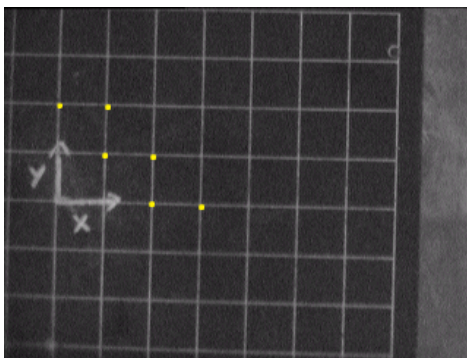


Image cam70.bmp

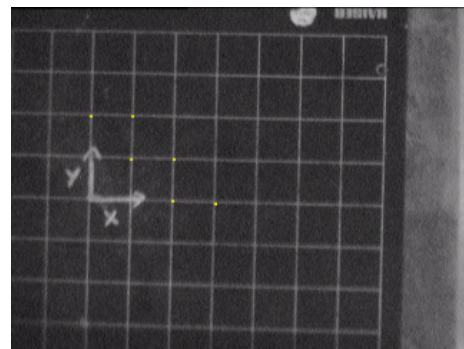


Cam80.bmp

Figure III.4 Eléments pour la calibration



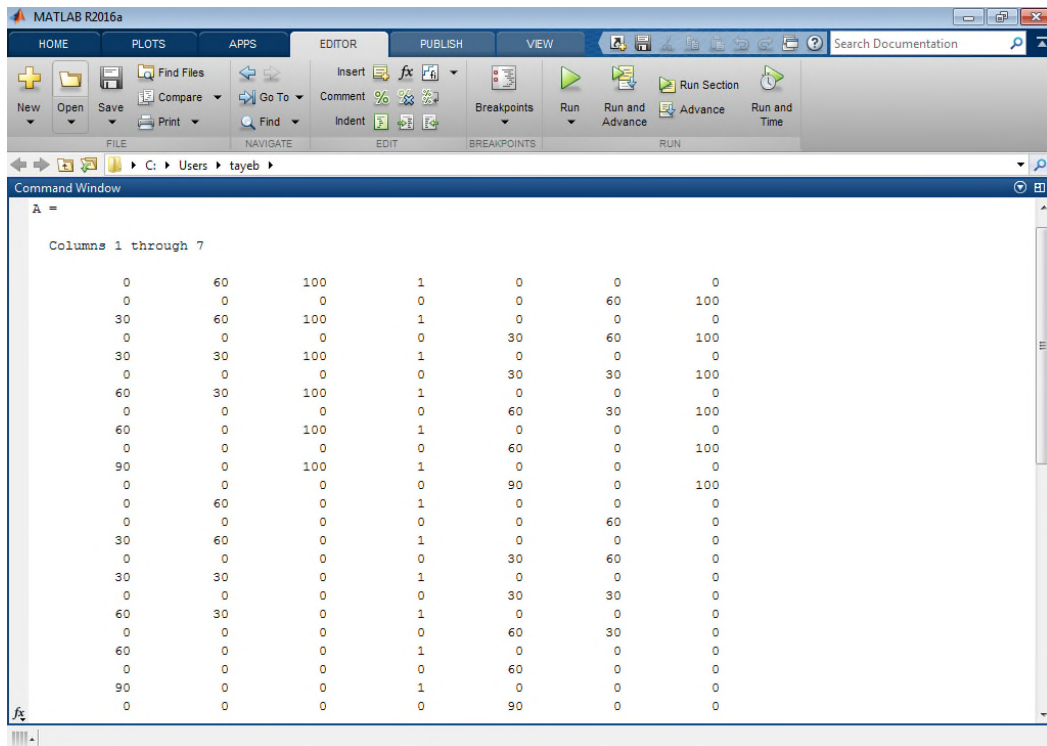
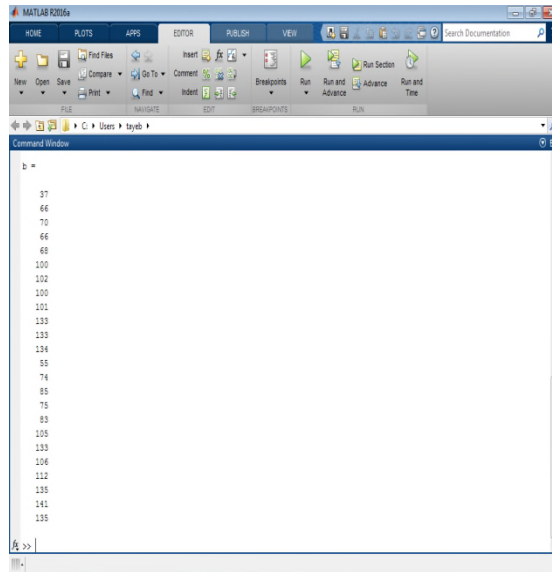
Choix du nuage de point pour Cam70.bmp

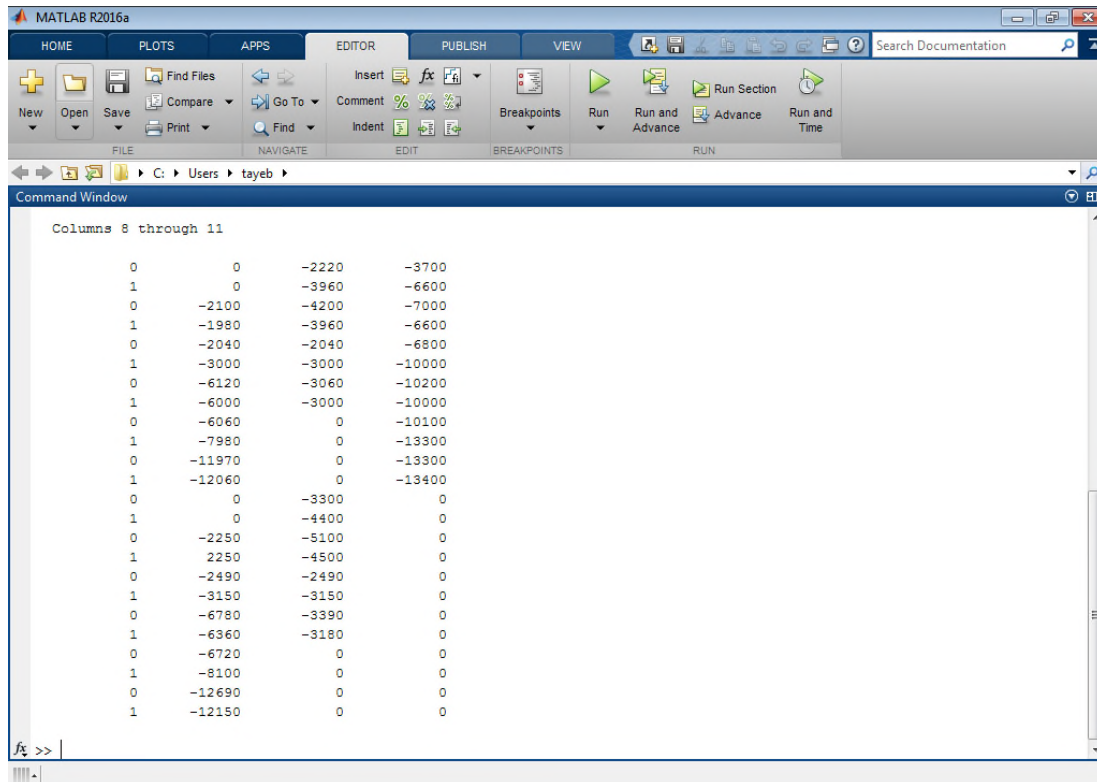


Choix du nuage de point pour
Cam80.bmp

Affichage des valeurs du vecteur b

Avec Matlab





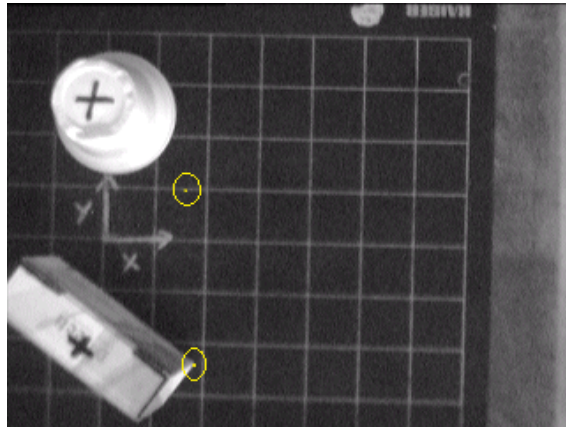
Affichage des valeurs du vecteur A

Avec Matlab

Figure III.5 Réalisation de la tâche de calibration

Etape 2 : génération des données pour la calibration

- Choix d'un nuage de 12 points (06 points dans chaque plan)
- Choix du premier plan (Cam70.bmp), (Z=100 mm).
- Pour chaque point (1):
 - a) Récupérer les coordonnées pixel.
 - b) Saisir au clavier les coordonnées 3D du point (en mm).
- Choisir le deuxième plan (Cam80.bmp), (Z=0), refaire (1)
- Générer les vecteurs A et B qui forme le système $A.C=B$. (avec Matlab)
- Enregistrer les vecteurs dans deux fichiers **A.txt** et **B.txt (workspace)**



P1 (105,204), P2 (100,105) en pixel

Z=0

```

Command Window
u =
    105
>> v=204
v =
    204
>> AA=[C(1,1)-u*C(3,1) C(1,2)-u*C(3,2);C(2,1)-v*C(3,1) C(2,2)-v*C(3,2) ]
AA =
    0.9635    0.2005
    0.1551   -0.4395
>> BB=[u-C(1,4);v-C(2,4)]
BB =
    50.4922
    73.4190
>> sol=inv(AA)*BB
sol =
    81.2068
   -138.3932

```

P1 (105,204)

```

MATLAB R2016a
HOME PLOTS APPS EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Find Files Compare Go To Comment % Indent Breakpoints Run
FILE NAVIGATE EDIT BREAKPOINTS
C:\Users\tayeb
Command Window
u =
    100
>> v=105
v =
    105
fx
>> AA=[C(1,1)-u*C(3,1) C(1,2)-u*C(3,2); C(2,1)-v*C(3,1) C(2,2)-v*C(3,2)]
AA =
    0.9565    0.1810
    0.0165   -0.8256
>> BB=[u-C(1,4); v-C(2,4)]
BB =
    45.4922
   -25.5810
>> sol=inv(AA)*BB
sol =
    41.5421
    31.8150

```

P2 (100,105)

Figure III.6 Validation du modèle de la caméra sur image avec objets

Etape 3 : Estimation de la matrice de projection (de calibration)

- Calculer la matrice de projection "C", par la méthode des moindres carrés:
$$C=(A^T A)^{-1} A^T .B$$
- Lancer le calcul avec **Matlab** en utilisant l'instruction **lsqlin(A,B)**
- Enregistrer le résultat dans un fichier (**C.mat**)

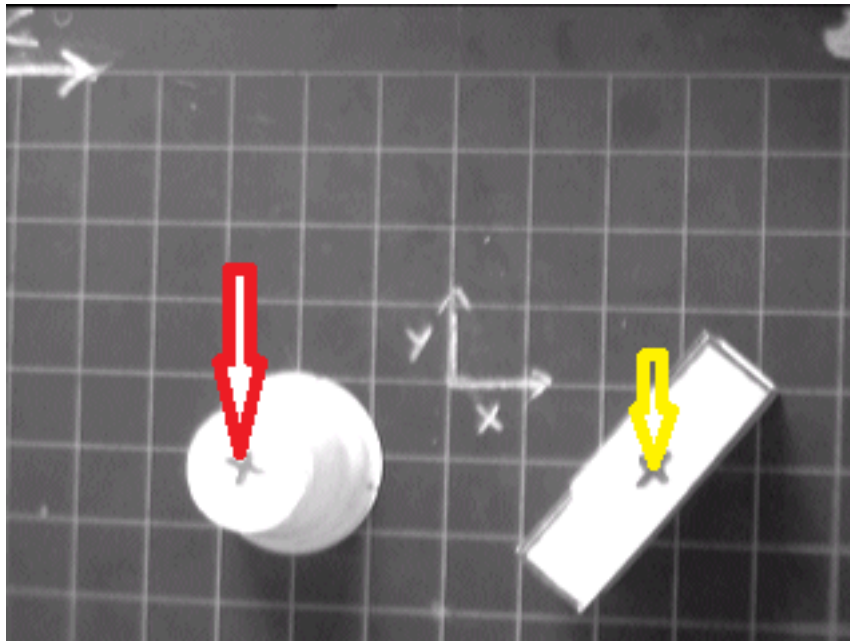
Etape 4 : validation

- charger une image Obj80.bmp contenant la mire avec des objets
- Sélectionner un point de la mire pour restituer les coordonnées objet (réelles).

Étape 5 : les coordonnées 3D

Les résultats trouvés lors, calcul de la position par stéréovision.

Les deux caméras observent la même scène, donnant deux images. Un même point P apparaît dans les deux images:



les coordonnées
3D sur image avec
objets

```

Editor - C:\Users\tayeb\TAYEB.m
calibration22.m  TAYEB.m  A.m  Untitled2.m  +
3 - clear all; clc
4 - Ag=[-120 60 100 1 0 0 0 0 -33*-120 -33*60 -33*100;
5     0 0 0 0 -120 60 100 1 -40*-120 -40*60 -40*100;
6     -30 60 100 1 0 0 0 0 -129*-30 -129*60 -129*100;
7     0 0 0 0 -30 60 100 1 -41*-30 -41*60 -41*100;
8     -30 0 100 1 0 0 0 0 -129*-30 -129*0 -129*100;
9     0 0 0 0 -30 0 100 1 -106*-30 0 -106*100;
10    60 0 100 1 0 0 0 0 -222*60 0 -222*100;|
11    0 0 0 0 60 0 100 1 -106*60 0 -106*100;
12    60 -60 100 1 0 0 0 0 -222*60 -222*-60 -222*100;
13    0 0 0 0 60 -60 100 1 -168*60 -168*-60 -168*100;
14    150 -60 100 1 0 0 0 0 -310*150 -310*-60 -310*100;
15    0 0 0 0 90 -60 100 1 -167*150 -167*-60 -167*100;
16
17    -120 60 0 1 0 0 0 0 -30*-120 -30*60 -30*0;
18    0 0 0 0 -120 60 0 1 -48*-120 -48*60 0;
19    -30 60 0 1 0 0 0 0 -117*-30 -117*60 0;
20    0 0 0 0 -30 60 0 1 -49*-30 -49*60 0;
21    -30 0 0 1 0 0 0 0 -116*-30 -116*0 0;
22    0 0 0 0 -30 0 0 1 -107*-30 107*0 0;
23    60 0 0 1 0 0 0 0 -199*60 199*0 0;
24    0 0 0 0 60 0 0 1 -107*60 107*0 0;
25    60 -60 0 1 0 0 0 0 -198*60 -198*-60 0;
26    0 0 0 0 60 -60 0 1 -162*60 -162*-60 0;
27    150 -60 0 1 0 0 0 0 -277*150 -277*-60 0;
28    0 0 0 0 150 -60 0 1 -162*150 -162*-60 0]
29
    
```

les valeurs de la
matrice A : image
de caméra gauche
et caméra droite.

```

Editor - C:\Users\tayeb\TAYEB.m
calibration22.m x TAYEB.m x A.m x Untitled2.m x +
30 - Ad=[-120 60 100 1 0 0 0 0 -25*-120 -25*60 -25*100;
31 -     0 0 0 0 -120 60 100 1 -73*-120 -73*60 -73*100;
32 -     -30 60 100 1 0 0 0 0 -118*-30 -118*60 -118*100;
33 -     0 0 0 0 -30 60 100 1 -74*-30 -74*60 -74*100;
34 -     -30 0 100 1 0 0 0 0 -116*-30 -116*0 -116*100;
35 -     0 0 0 0 -30 0 100 1 -139*-30 0 -139*100;
36 -     60 0 100 1 0 0 0 0 -213*60 0 -213*100;
37 -     0 0 0 0 60 0 100 1 -142*60 0 -142*100;
38 -     60 -60 100 1 0 0 0 0 -211*60 -211*-60 -211*100;
39 -     0 0 0 0 60 -60 100 1 -207*60 -207*-60 -207*100;
40 -     150 -60 100 1 0 0 0 0 -311*150 -311*-60 -311*100;
41 -     0 0 0 0 90 -60 100 1 -212*150 -212*-60 -212*100;
42
43 -     -120 60 0 1 0 0 0 0 -56*-120 -56*60 -56*0;
44 -     0 0 0 0 -120 60 0 1 -81*-120 -81*60 0;
45 -     -30 60 0 1 0 0 0 0 -138*-30 -138*60 0;
46 -     0 0 0 0 -30 60 0 1 -83*-30 -83*60 0;
47 -     -30 0 0 1 0 0 0 0 -136*-30 -136*0 0;
48 -     0 0 0 0 -30 0 0 1 -141*-30 141*0 0;
49 -     60 0 0 1 0 0 0 0 -223*60 223*0 0;
50 -     0 0 0 0 60 0 0 1 -143*60 143*0 0;
51 -     60 -60 0 1 0 0 0 0 -222*60 -222*-60 0;
52 -     0 0 0 0 60 -60 0 1 -200*60 -200*-60 0;
53 -     150 -60 0 1 0 0 0 0 -310*150 -310*-60 0;
54 -     0 0 0 0 150 -60 0 1 -203*150 -203*-60 0]
55 - bg=[33;40;129;41;129;106;222;106;222;168;310;167
56 -     30;48;117;49;116;107;199;107;198;162;277;162]

```

```

Editor - C:\Users\tayeb\TAYEB.m
calibration22.m x TAYEB.m x A.m x Untitled2.m x +
57
58 - bd=[25;73;118;74;116;139;213;142;211;207;311;212
59 -     56;81;138;83;136;141;223;143;222;200;310;203]
60 - %modele de la camera g
61 - cg=lsqmlin(Ag,bg)
62 - C11g=cg(1); C12g=cg(2); C13g=cg(3); C14g=cg(4);
63 - C21g=cg(5); C22g=cg(6); C23g=cg(7); C24g=cg(8);
64 - C31g=cg(9); C32g=cg(10);C33g=cg(11); C34g=1;
65 - %modele de la camera d
66 - cd=lsqmlin(Ad,bd)
67 - C11d=cd(1); C12d=cd(2); C13d=cd(3); C14d=cd(4);
68 - C21d=cd(5); C22d=cd(6); C23d=cd(7); C24d=cd(8);
69 - C31d=cd(9); C32d=cd(10);C33d=cd(11); C34d=1;
70 - %restitution de X,Y Z connu=0]
71 - ug=92;vg=140;
72 - ud=89;vd=173;
73 - As(1,1)=C11g-ug*C31g; As(1,2)=C12g-ug*C32g; As(1,3)=C13g-ug*C33g;
74 - As(2,1)=C21g-vg*C31g; As(2,2)=C22g-vg*C32g; As(2,3)=C23g-vg*C33g;
75 - As(3,1)=vg*C11g-ug*C21g; As(3,2)=vg*C12g-ug*C22g; As(3,3)=vg*C13g-ug*C23g;
76
77 - As(4,1)=C11d-ud*C31d; As(4,2)=C12d-ud*C32d; As(4,3)=C13d-ud*C33d;
78 - As(5,1)=C21d-vd*C31d; As(5,2)=C22d-vd*C32d; As(5,3)=C23d-vd*C33d;
79 - As(6,1)=vd*C11d-ud*C21d; As(6,2)=vd*C12d-ud*C22d; As(6,3)=vd*C13d-ud*C23d;
80
81 - bs(1)=- (C14g-ug*C34g);
82 - bs(2)=- (C24g-vg*C34g);
83 - bs(3)=- (vg*C14g-ug*C24g);
84 - bs(4)=- (C14d-ud*C34d);
85
86 - bs(5)=- (C24d-vd*C34d);
87 - bs(6)=- (vd*C14d-ud*C24d);
88 - P=lsqmlin(As,bs')
89
script

```

Les valeurs de la matrice B : image de caméra gauche et caméra droite.

Restitution de X, Y, Z connu=0

avec (u,v) de l'objet 1

Figure III.7 Réalisation de la tâche de calibration de deux caméras.

Command Window

Ag =

Columns 1 through 7

-120	60	100	1	0	0	
0	0	0	0	-120	60	
-30	60	100	1	0	0	
0	0	0	0	-30	60	
-30	0	100	1	0	0	
0	0	0	0	-30	0	
60	0	100	1	0	0	
0	0	0	0	60	0	
60	-60	100	1	0	0	
0	0	0	0	60	-60	
150	-60	100	1	0	0	
0	0	0	0	90	-60	
-120	60	0	1	0	0	
0	0	0	0	-120	60	
-30	60	0	1	0	0	
0	0	0	0	-30	60	
-30	0	0	1	0	0	
0	0	0	0	-30	0	
60	0	0	1	0	0	
0	0	0	0	60	0	
60	-60	0	1	0	0	
0	0	0	0	60	-60	
150	-60	0	1	0	0	
0	0	0	0	150	-60	

f_x

Les résultats
des
coordonnées
de l'objet 1

Command Window

Columns 8 through 11

0	3960	-1980	-3300
1	4800	-2400	-4000
0	3870	-7740	-12900
1	1230	-2460	-4100
0	3870	0	-12900
1	3180	0	-10600
0	-13320	0	-22200
1	-6360	0	-10600
0	-13320	13320	-22200
1	-10080	10080	-16800
0	-46500	18600	-31000
1	-25050	10020	-16700
0	3600	-1800	0
1	5760	-2880	0
0	3510	-7020	0
1	1470	-2940	0
0	3480	0	0
1	3210	0	0
0	-11940	0	0
1	-6420	0	0
0	-11880	11880	0
1	-9720	9720	0
0	-41550	16620	0
1	-24300	9720	0

f_x

```

Command Window
Ad =

Columns 1 through 7

    -120     60    100     1     0     0
         0     0     0     0   -120    60
    -30     60    100     1     0     0
         0     0     0     0   -30    60
    -30     0    100     1     0     0
         0     0     0     0   -30     0
         60     0    100     1     0     0
         0     0     0     0     60     0
         60    -60    100     1     0     0
         0     0     0     0     60   -60
        150   -60    100     1     0     0
         0     0     0     0     90   -60
       -120    60     0     1     0     0
         0     0     0     0   -120    60
       -30    60     0     1     0     0
         0     0     0     0   -30    60
       -30     0     0     1     0     0
         0     0     0     0   -30     0
         60     0     0     1     0     0
         0     0     0     0     60     0
         60    -60     0     1     0     0
         0     0     0     0     60   -60
        150   -60     0     1     0     0
         0     0     0     0    150   -60
    
```

```

Command Window
bg =

    33
    40
   129
    41
   129
   106
   222
   106
   222
   168
   310
   167
    30
    48
   117
    49
   116
   107
   199
   107
   198
   162
   277
   162
    
```

```

Command Window

Columns 8 through 11

    0    3000    -1500    -2500
    1    8760    -4380    -7300
    0    3540    -7080    -11800
    1    2220    -4440    -7400
    0    3480         0    -11600
    1    4170         0    -13900
    0   -12780         0    -21300
    1   -8520         0    -14200
    0   -12660    12660    -21100
    1   -12420    12420    -20700
    0   -46650    18660    -31100
    1   -31800    12720    -21200
    0     6720    -3360         0
    1     9720    -4860         0
    0     4140    -8280         0
    1     2490    -4980         0
    0     4080         0         0
    1     4230         0         0
    0   -13380         0         0
    1    -8580         0         0
    0   -13320    13320         0
    1   -12000    12000         0
    0   -46500    18600         0
    1   -30450    12180         0
    
```

```

Command Window

bd =

    25
    73
   118
    74
   116
   139
   213
   142
   211
   207
   311
   212
    56
    81
   138
    83
   136
   141
   223
   143
   222
   200
   310
   203
    
```

```

Command Window
cg =
    0.9428
   -0.0237
   -0.0153
  144.0297
    0.0192
   -0.9612
   -0.1275
  106.7300
    0.0002
   -0.0002
   -0.0011

cd =
    0.9109
    0.0103
   -0.3418
  165.3454
   -0.0042
   -0.9675
   -0.1690
  140.8424
   -0.0002
   -0.0001
   -0.0011
fx
    
```

```

P =
    87.0394
   -28.6638
    97.3287
fx >>
    
```

```

70 %restitution de X,Y Z connu=0
71 -   ug=248;vg=136;
72 -   ud=242;vd=174;
    
```

Restitution de X,Y,Z connu=0 avec (u,v) de l'objet 2

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
-62.9870
-33.3335
 72.3823
fx >>
    
```

Les résultats des coordonnées de l'objet 2

Figure III.8 Validation du modèle de deux caméras sur deux images (gauche, droite) avec deux objets.

III-5 Conclusion :

D'après les résultats trouvés lors des expérimentations, on déduit :

- Plus le nuage de points est grand plus l'estimation du modèle de camera est fiable.
- Plus le nuage est dispersé plus la fiabilité du modèle est bonne.
- Si tous les points sont alignés (vertical, horizontale) la matrice A est non inversible et le système n'admet pas de solution.

Le robot nécessite des données sur son environnement : la stéréovision est une solution qui peut fournir des coordonnées pour faire une tâche de mouvement avec un Modèle Géométrique Inverse **MGI**.

Conclusion générale

La définition que nous avons choisi pour un « robot » nécessite que l'appareil obtient des données sur son environnement, prenne une décision, Le rôle d'un système de vision industrielle est avant tout de produire une image de qualité qui permette de réaliser des mesures adéquates. De toute évidence, la technique de stéréovision et des autres utilisés dans le système jouent ici un rôle crucial pour assurer la qualité de l'image, et ont également un impact sur la vitesse, la précision de mesure, la reproductibilité et la fiabilité de l'analyse en aval.

Calibration de deux caméra par la Méthode des Moindres carrées jouent un rôle essentiel dans l'optimisation des conditions de contrôle et de mesure effectués par un système de vision industrielle.

La stéréovision est une solution qui peut fournir des coordonnées pour faire une tâche de mouvement avec un Modèle Géométrique Inverse **MGI**.

Références Bibliographiques

Chapitre I

- [1]. « Vision par ordinateur », Abdelhamid LOUKIL, Cours de magister : Vision et Reconnaissance de Formes, USTO, 2005.
- [2]. Ahmed Nabil Belbachir, “*Smart Cameras*”, New York, Springer, 2009.
- [3]. Yves Le Men, *La vision dans le monde animal*, AlterPublishing, 2015, p. 231.
- [4]. BENZAOUI Wafa, « CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE », Mémoire de Magister, l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2011.
- [5]. C. Wheatstone, « Contributions to the physiology of vision. Part I. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, n° 128, 1838 .
- [6]. Graham R. Martin , Kerry-Jayne Wilson, J. Martin Wild, Stuart Parsons, M. Fabiana Kubke, Jeremy Corfield, « Kiwi Forego Vision in the Guidance of Their Nocturnal Activities », *PLOS One*, vol. 2, n° 2, 2007 .

Chapitre II

- [1]. BENZAOUI Wafa, « CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE », Mémoire de Magister, l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2011.
- [2]. M. ZAYED. « Véhicules Intelligents: Etude et développement d'un capteur intelligent de vision pour l'attelage virtuel ». Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille. 2005.
- [3]. A. ZIGH. : « Calibration d'une caméra, utilisation des réseaux de neurones artificiels », Thèse de Magistère de l'Université des sciences et de la technologie M-B d'Oran, Laboratoire de recherches en systèmes intelligents LARESI, 2003.
- [4]. Les caméras, méthode des moindres carrées, www.Wikipedia.org, consulté le : 25 mars 2018.
- [5]. G. STEIN. « Lens distortion calibration using point correspondences », Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97), San Juan, Puerto Rico; 602–608, June 1997.
- [6]. P. STUR, S. MAYBANK, "On plane-based camera calibration: A general algorithm, singularities, applications". In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 432–437, Fort Collins, Colorado, IEEE Computer Society Press. 1999.
- [7]. Abderrahmane ADDA BENATTIA, « Etude et réalisation d'une station de Télé-TP, Chap3-Plate-forme matérielle », Thèse de magister, USTO, 2008.
- [8]. F. PEDERSINI, et al, « Accurate and simple geometric calibration of multi-camera

Références Bibliographiques

systems», Signal Processing 77. 309–334. 1999.

Chapitre III

- [1]. Abderrahmane ADDA BENATTIA, « Etude et réalisation d'une station de Télé-TP, Chap3-Plate-forme matérielle », Thèse de magister, USTO, 2008.

.

MATLAB ()
)
 .(
 **Z** ()
 ()
 :

معايرة الكامرة، برنامج مطلب، التحسين غير الخطي، الاستريو

Résumé

Les travaux de notre mémoire s'inscrivent dans le cadre de calibration des caméras. Le calibrage est une phase délicate nécessaire dans nombreuses applications comme la reconstruction tridimensionnelle et la réalité augmentée où nous avons besoin de localiser les objets par rapport à la caméra.

Ce travail nous a permis de se familiariser avec le système de vision et notamment l'opération de calibration (estimation des paramètres intrinsèque et extrinsèques), d'utiliser le logiciel MATLAB pour le calcul matriciel, et d'avoir les coordonnées 3D à partir d'une image 2D (restitution des coordonnées objets).

Mais serte, pour une bonne précision, il nous faut une troisième composante (la profondeur Z) alors nous optons pour la stéréo vision (utilisation de deux cameras).

Mots clés :

Calibration de Camera, Matlab, Optimisation non linéaire, stéréovision.