Augmented Reality(AR): Issues, Trends and Challenges

Malik MALLEM

IBISC

Equipe IRA² : Interactions, Réalité Augmentée, Robotique Ambiante

40, rue du Pelvoux

91020 Courcouronnes Cedex

Outline of talk

- Introduction
- Sensors modeling and calibration
- Visual and Hybrid tracking
- AR' Projects
- Conclusions and challenges

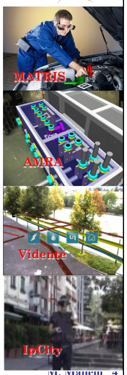
Introduction

- **Definition :** Augmented Reality (AR) enhances, complete, restore, predict the reality.
- **Objective :** enhance user perception in his real environment. Enhancement could concern all user senses like visual, audio and haptic.
- **Research :** tracking and registration problem is one of the most fundamental challenges, which is still open.

ibisc

Introduction

- **Augmented Reality:**
  - **Combination of virtual data and real scenes.**
- **Need to ensure visual coherence between two worlds:**
  - **Estimation of the camera pose (position and orientation).**
- **Vision-based methods widely used:**
  - **Still sensitive to outdoor conditions (mobility, change in brightness, occlusion, …).**



ibisc

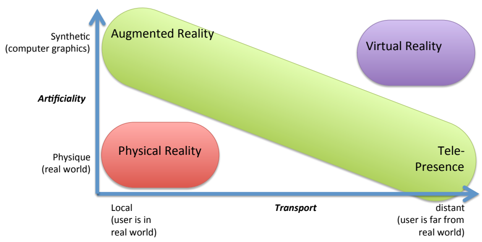
Introduction

Real–Virtual Continuum [Milgram 1994]

- **Fondamental Rules of AR System:**
  - real/virtual Registration
  - real-time Interaction
  - sensorial coherence

ibisc

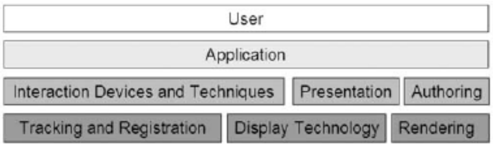
Introduction



Benford Classification[Benford 1998]

Introduction
AR System

AR System allows virtual enhancement of real environment and and real time interaction.



[Bimber2005]

Introduction
AR System

Constraints :

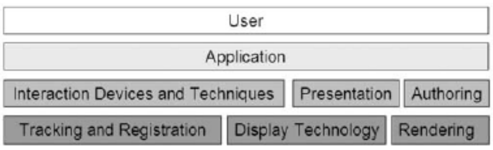
- Augmented Reality System require targets visibility to allow tracking
- The tracking methods may fail under unfavorable conditions of the environment, due to:
  - Presence of important noise
  - Lighting/contrast conditions
  - Occlusion of the target object by an other object

Challenges :

- Localization in real time of the tracking system
- Partial/Total occlusion handling
- Sudden sensors motion
- Elaboration of a multimodal tracking architecture in presence of occlusion for Augmented Reality

Introduction
AR System

AR System allows virtual enhancement of real environment and and real time interaction.



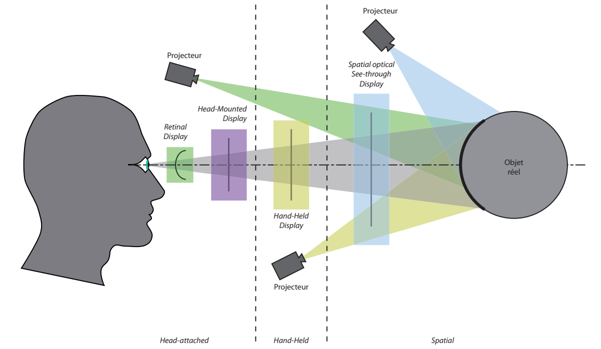
[Bimber2005]

Keywords : Sensors Calibration, 3D modelling, Prediction, 3D registration, Tracking, Rendering, Tangible interface, 3D interaction, Data presentation, Scenario presentation.

ibisc

Introduction
visual augmentation

université evry val-d'essonne



[Courtesy of D.Roussel]

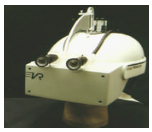
ibisc

Introduction
visualisation devices

université evry val-d'essonne

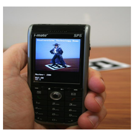
- Headworn

Optical see through



Video see through

- 3D screen



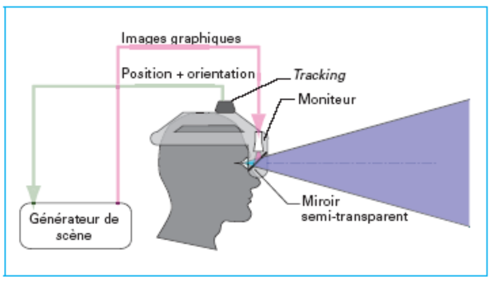
PDA

- Handheld

ibisc

Introduction
visualisation devices

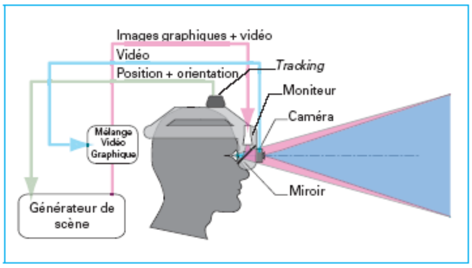
université evry val-d'essonne



Head worn device: Optical see-through

[Courtesy of D.Roussel]

Introduction
visualisation devices



Head worn device: Video see-through

[Courtesy of D.Roussel]

Introduction
Localisation sensors

IMU

US

camera

Magnetic

GPS

Introduction
Wearable AR devices

[Behzadan 2005]

Outline of talk

- Introduction
- Sensors modeling and calibrating
- Visual and Hybrid tracking
- IBISC' Projects
- Conclusions and challenges

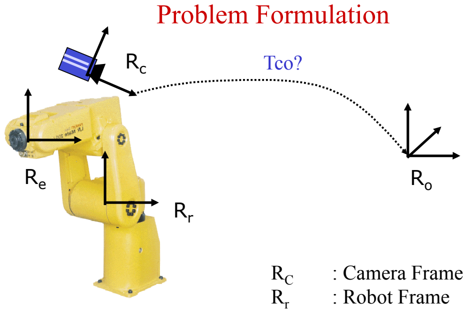
Sensor(s) Modelling and calibration

Sensor (s) = | - 3D sensor → 3D reconstruction
- camera → real/virtual superimposition
- robot → 3D reconstruction, automatic camera calibration

Pre-condition :
Learning Points in different coordinates frames

Post-condition :
Sensor(s) parameters

Example : Camera Modelling and Calibration Problem Formulation



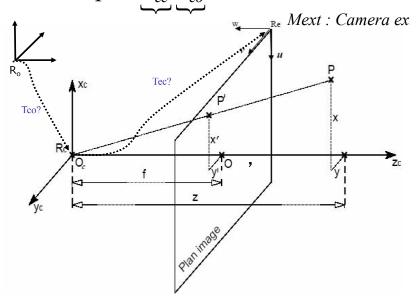
R_C : Camera Frame
R_r : Robot Frame
Re : End-Effector Frame
R_o : Object Frame

ibisc

Camera Model

$$p = \overbrace{\underbrace{T_{ec}}}^{M\,\text{int}}\ \overbrace{\underbrace{T_{co}}}^{Mext}\ P \quad (1)$$

p : 2D point,
P : 3D point,
Mint : Camera internal model,
Mext : Camera external model.



ibisc

Camera Model

$$(1) \Leftrightarrow \begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = M\,\text{int}\ \ Mext \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_{14} \\ m_2 & m_{24} \\ m_3 & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} u = {P^t m_1 + m_{14}} \big/ {P^t m_3 + m_{34}} \\ v = {P^t m_2 + m_{24}} \big/ {P^t m_3 + m_{34}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} P^t.n_u + a_u = 0 \\ P^t.n_v + a_v = 0 \end{cases}, \ avec\ n_u = m_1 - u.m_3 \quad n_v = m_2 - v.m_3 \quad a_u = m_{14} - u.m_{34} \quad a_v = m_{24} - v.m_{34}$$

(2) : Equation of a visual ray including P, p and Oc.

ibisc

Camera Calibration mij Estimation

$$(2) \Leftrightarrow \begin{cases} u = \dfrac{m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14}}{m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}} \\ v = \dfrac{m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24}}{m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}} \end{cases} \quad (3)$$

•6 non coplanar points at least are used.

$$(3) \Leftrightarrow \begin{array}{l} m_{11}x_i + m_{12}y_i + m_{13}z_i + m_{14} - u_i m_{31}x_i - u_i m_{32}y_i - u_i m_{33}z_i = u_i m_{34} \\ m_{21}x_i + m_{22}y_i + m_{23}z_i + m_{24} - v_i m_{31}x_i - v_i m_{32}y_i - v_i m_{33}z_i = v_i m_{34} \end{array} \quad (4)$$

•Least square method is applied to estimate mij.

ibiSc

Calibration de caméra
mij Estimation

•2N équations for N known points, are expressed as :

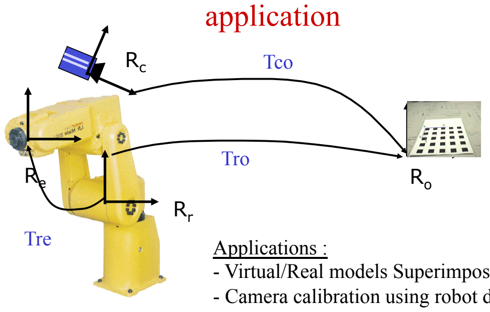
$$
\begin{bmatrix} & & & & & & \vdots & & & & \\ x_i & y_i & z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i x_i & -u_i y_i & -u_i z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_i & y_i & z_i & 1 & -v_i x_i & -v_i y_i & -v_i z_i \\ & & & & & & \vdots & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ u_i m_{34} \\ v_i m_{34} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5)
$$

•(5) represents a linear system : $H.m = p$

•Estimation of mij is obtained as follows : $m = (H^t.H)^{-1}.H^t.p$ (6)

ibiSc

Camera calibration : application



Applications :
- Virtual/Real models Superimposition,
- Camera calibration using robot data.

ibiSc

Outline of talk

- Introduction
- Sensors modeling and calibrating
- Visual and Hybrid tracking
- IBISC' Projects
- Conclusions and challenges

Tracking

Objective: virtual ans real worlds coherence

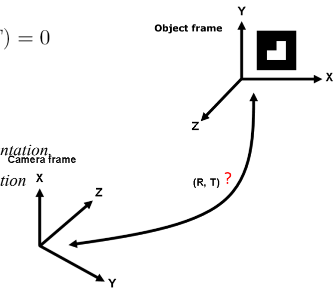
Pre-conditions :
-Sensor(s) modelling and calibration,
-Target(marker) image processing,
-Partial virtual model of the environment known.

Post-condition :
Pose sensor(s) updating

Tracking
Problem Formulation

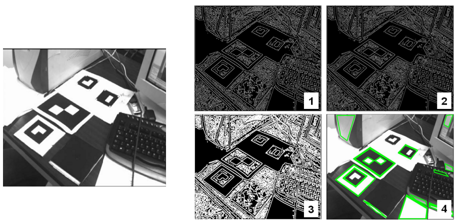
$$F(p, P, M_{int}, R, T) = 0$$

p : 2D point,
P : 3D point,
Mint : Camera model,
R : Camera/Object orientation,
T : Camera/Object position

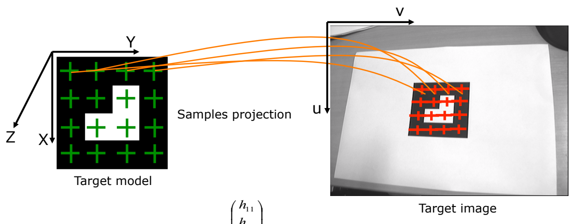


Vision based Tracking
Image processing

1. Contours detection
2. Image smoothing
3. Image dilatation
4. Polygonal approximation of contour
5. Computation of minimal angles between edges



Vision based Tracking
Target Identification

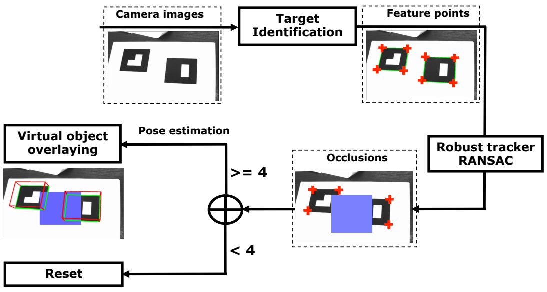


$$\begin{pmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -xu & -yu \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -xv & -yv \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{33}u \\ h_{33}v \end{pmatrix}$$

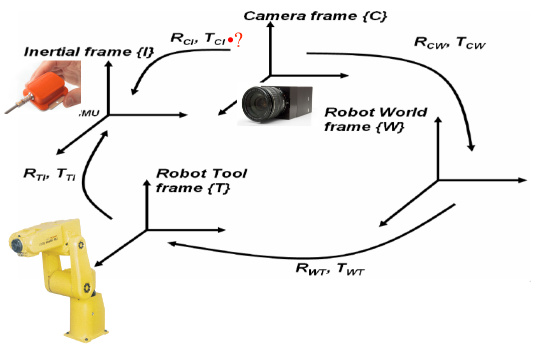
Target code

$1001100000_{binary} = 608_{decimal}$

Vision based Tracking
Target localisation



Hybrid Tracking
Sensors calibration



Hybrid Tracking
Sensors calibration

- IMU Calibration
  - IMU Orientation

$$R_{CI} = \underbrace{R_{CW}}_{\text{From camera calibration}} \cdot \overbrace{R_{WT}}^{\text{Computed by robot}} \cdot \underbrace{R_{TI}}_{\text{Fixed by user}}$$

- IMU Translation

Computed by robot

$$T_{WI} = R_{WT} \cdot T_{TI} + T_{WT}$$

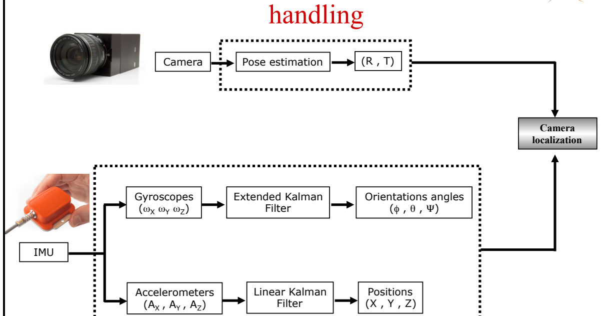
Fixed by user

$$T_{CI} = R_{CW} \cdot T_{WI} + T_{CW}$$

From camera calibration

[Maidi,icinco' 2005]

Hybrid Tracking
Target Localisation and occlusion handling



Hybrid Tracking
(Maidi 2007,thesis)

Tracking

•Still open problems in tracking and registration

- Spatial Alignement
  - Optical Distorsions
  - Sensors Sensibility
  - Pose Estimation Errors
- Latency Time
  - Acquisition Delay
  - Processing Time
  - Rendering Time
- Vision conditions
  - Image restoration
  - Shadow management
- Occlusion handling
  - Partial occulsion
  - Total occlusion
- Motion management
  - Abrupt motion
  - Non regular motion

ibisc

Outcome and future works

- This work allowed to :
  - overcome some limitations related to the realization of a tracking system in AR.
  - solve the problem of markers registration by establishing a multimodal architecture of tracking and occlusion handling.
- This architecture is composed of :
  - registration module of coded targets.
  - module of feature points tracking and occlusions management.
  - multi-sensors tracking part.
- Experimental results proved that the proposed architecture :
  - can track visible, partially or totally occulted targets.
  - computes there pose under various camera viewpoints in real time.
- Our future work is to :
  - develop a markerless system which uses natural markers instead of coded targets.
  - improve the hybrid tracking system by compensating the IMU drift and using another positioning sensor to obtain more accurate positions.

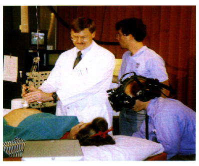
ibisc

Outline of talk

- Introduction
- Sensors modeling and calibrating
- Visual and Hybrid tracking
- AR Projects
- Conclusions and challenges

ibisc

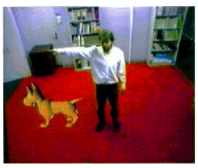
Potential Applications



Medical

Maintaining

Military



edutainment

Some Generic AR projects

•Generic projects

•Sutherland : [Sutherland, 1968] - USA – Video see throught+robot
•(AR Faisability)

•KARMA : [Feiner et al., 1993 et 1996]-US- mono vision+US

•AR2Hockey : [Ohshira et al., 1998]-Japon- i-glasses+Polhemus
•(hockey game on real table - puck is virtuel)

•CAMELOT : [Broll et al., 2000] -Germany - Sony LDI100 +2 cameras
•(Collaborative AR)

•iMAGIS: [Grasset et Gascuel, 2001] - France - i-glasses +Flock of birds
•(Collaborative AR)

Some AR Industrial Projects

- Boeing : [Neunmann et Majoros, 1998] -US- coded markers
  - **(Aircraft Conception and maintaining),**
- ARVIKA : [Arvika, url 1999]- Germany- coded markers
- **(Conception et maintenance industrielle) http://www.arvika.de**
- ARTESAS : [Arvika, url 2004]- Germany- markerless
  - **(Industrial Conception and maintaining)**
- Starmate : [Schwald et de Laval, 2003]-(ZGDV+EADS)
  - **(Industrial Conception and maintaining)**
- AMRA : [Didier et al., 2005]-France
  - (Train **Conception and maintaining**)

Some links and references

- **http://www.se.rit.edu/~jrv/research/ar/**
- **[Sutherland, 1968]** I. Sutherland (1968). A head-mounted three dimensional display. Computer Conference, pages 757–764, Washington DC. Thompson Books.
- **[Ohshira et al., 1998]** T. Ohshira, K. Satoh, H. Yamamoto, et H. Tamura (1998). Ar2hockey : A case study of collaborative augmented reality. Dans Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'98), pages 268–275, Atlanta.
- **[Broll et al., 2000]** W. Broll, E. Meier, et T. Shardt (2000). The virtual round table : a collaborative augmented multi-user environment. Dans Proceedings of ACM Collaborative Virtual Environments, pages 39–46, San Francisco. ACM.
- **[Grasset et Gascuel, 2001]** R. Grasset et J.-D. Gascuel (2001). Environnement de réalité augmentée collaboratif : Manipulation d'objets réels et virtuels. Dans AFIG '01 (Actes des 14èmes journéees de l'AFIG), pages 101–112.
- **[Feiner et al., 1993]** S. Feiner, B. MacIntyre, et D. Seligmann (1993). Knowledge-based augmented reality. Communications of the ACM, 36(7) :52–62.

Some links and references

[Neunmann et Majoros, 1998] U. Neunmann et A. Majoros (1998). Cognitive, performance and system issues for augmented reality applications in manufacturing and maintenance. Dans Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS' 98), pages 4–11, Atlanta. IEEE.

[Arvika, url] Arvika augmented reality for development, production and servicing. http ://www.arvika.de.

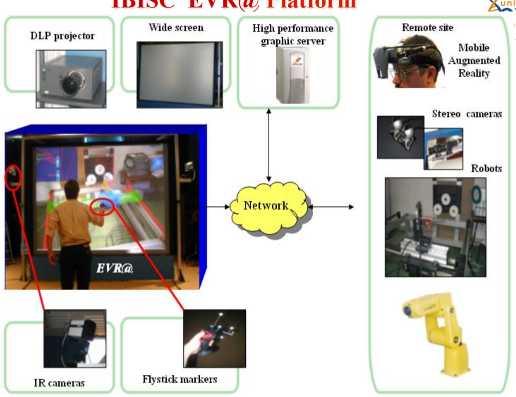
[Schwald et de Laval, 2003] B. Schwald et B. de Laval (2003). An augmented reality system for training and assistence to maintenance in the industrial context. Dans Proc. 11th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision' 2003 (WSCG).

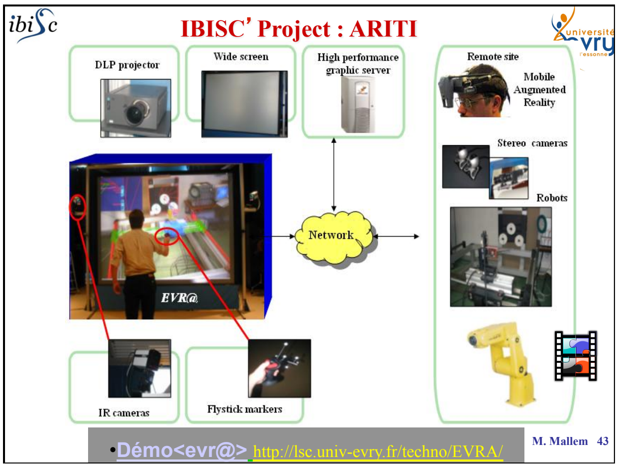
[Didier et al., 2005] J.-Y. Didier, D. Roussel, M. Mallem, S. Otmane, S. Naudet, Q.-C. Pham, S. Bourgeois, C. Mégard, C. Leroux, et A. Hocquard (2005). Amra : Augmented reality assistance in train maintenance tasks. Dans Workshop on Industrial Augmented Reality (ISMAR' 05), Vienne, Autriche.

IBISC' Projects

- Tele Robotique
- Industrial application
- AR for Archeology
- Outdoor AR

IBISC' EVR@ Platform





IBISC' Project : AMRA

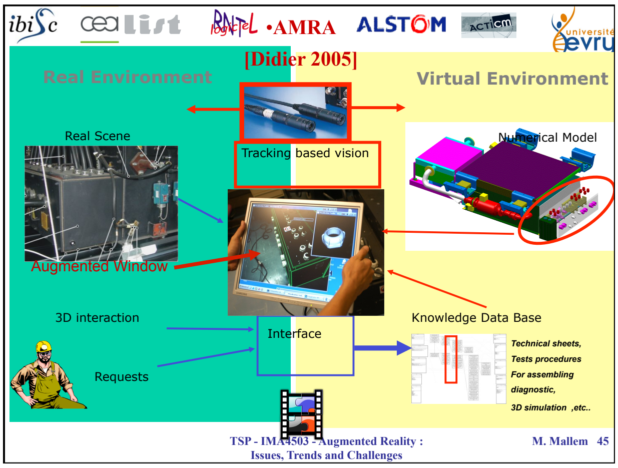
Assistance à la Maintenance en Réalité Augmentée : AMRA

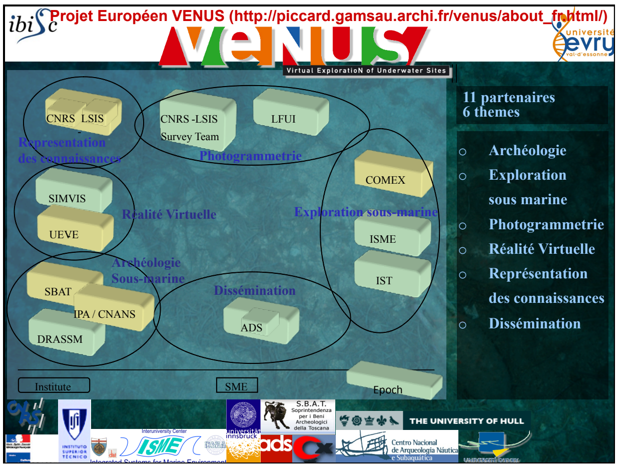
Consortium : ALSTOM TRANSPORT, CEA SRSI/LCEI,ActiCM

Objective : Conception and implementation of an Augmented Reality (AR) system for mobile use in industrial applications such as train maintenance and repairs in industrial sites.

Research : Robust visual based tracking dedicated to augmented window concept (hand held device)

TSP - IMA4503 - Augmented Reality : Issues, Trends and Challenges M. Mallem 44





IBISC'Project : AR Venus

European Project VENUS (http://piccard.gamsau.archi.fr/venus/about_fr.html/)

- **VENUS: Virtual ExploratioN of Underwater Sites**
- **Deep wreck sites are out of reach of divers**
- **Provide technological tools for the virtual exploration of deep underwater archaeology sites**

LSIS Marseille

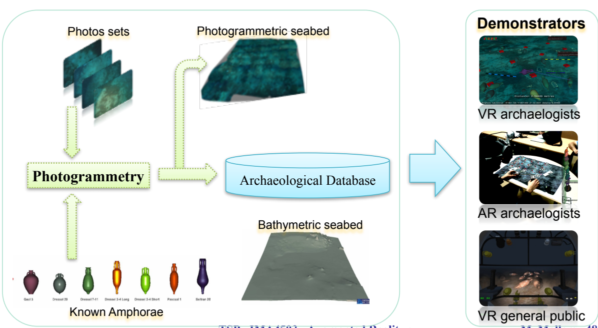
THE UNIVERSITY OF HULL

SIMVIS Univ. Hull

Univ. Evry

TSP - IMA4503 - Augmented Reality : Issues, Trends and Challenges   M. Mallem 47

IBISC'Project : AR Venus

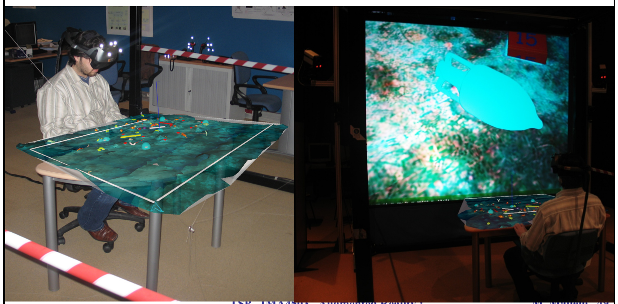


TSP - IMA4503 - Augmented Reality : Issues, Trends and Challenges   M. Mallem 48

Projet Européen VENUS (http://piccard.gamsau.archi.fr/venus/about_fr.html/)

AR Venus

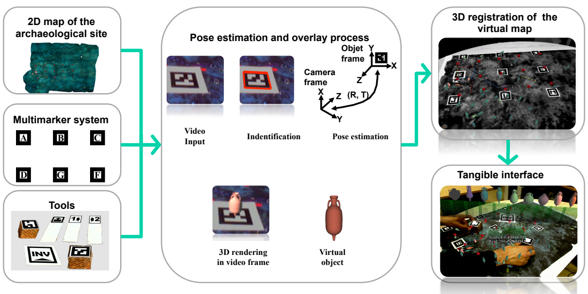
- 3D Map on a table
- AR + VR demonstrators



Archaeological Augmented Reality demonstrator - Goals

- Use a real map representing the deep underwater site.
- Enrich this map and complete the real-world perception by adding synthetic elements
- Provide an easy tool to interact with the map with (real) tangible interface
- Using a see-through HMD to see the real map augmented in real time with computer-generated features

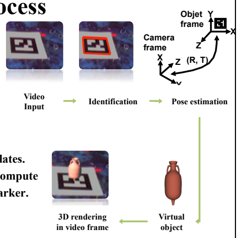
Archaeological Augmented Reality demonstrator - structure



Archaeological Augmented Reality demonstrator

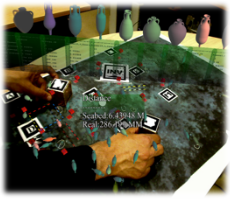
- Pose estimation and overlay process
  - ➢ Goal

    Project the 3D models of the seabed on the real 2D map using a system of visual markers identification and a pose estimation algorithm.
  - ➢ Registration process
    - ➢ Find all squares in the binary image.
    - ➢ mach these targets to some pre-trained pattern templates.
    - ➢ The square size and pattern orientation are used to compute the position of the camera relative to the physical marker.
    - ➢ Overlay the 3D models on the real scene.



Archaeological Augmented Reality demonstrator [Haydar 2008]

- Tangible interface
  - ➢ Several moving targets have been associated with virtual tools such as measuring tool and inventory tool:
    - The inventory tool is attached to a single target and displays the site's artifacts inventory.
    - The measuring tool displays the distance within the VE between two attached targets.
  - ➢ These tools are activated whenever the camera identifies their corresponding patterns and discarded when they aren't visible anymore.
  - ➢ No learning or 3D skills required → tangible tools affordance



IBISC' Project : RAXENV:

Réalité Augmentée en eXtérieur appliquée aux Métiers de l'ENVironnement

ANR Project

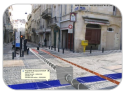
Dec 2006 – June 2010

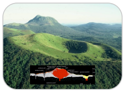
ANR Projet Raxenv (http://raxenv.brgm.fr/)

Objective

> Navigation and interaction of HO with AR system in differents sites.


Castle restoration


Urbain site


Panoramic site

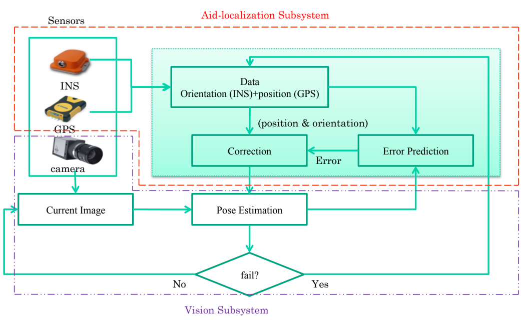
ANR Projet Raxenv (http://raxenv.brgm.fr/)

ZENDJEBIL, VRST' 08]

- Technical Goal:
  - Replace vision subsystem when it fails.
- Issues:
  - Each sensor provides data in its own reference frame.
    - ☞ The pose provided by the Aid-Localization subsystem must be aligned with the camera reference frame.
  - The Aid-Localization subsystem is less accurate than vision subsystem.
    - ☞ We need to quantify the accuracy of measurements and improve the estimation of the localization.

RAXENV

Projet ANR Raxenv (http://raxenv.brgm.fr/)



RAXENV

Projet ANR Raxenv (http://raxenv.brgm.fr/)

How to align the Aid-Localization subsystem with camera reference frame ?

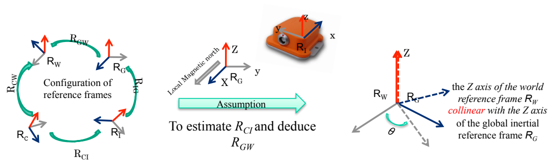
Two Calibration processes

- Inertial/Camera calibration.
- GPS/Camera calibration.

Projet ANR Raxenv (http://raxenv.brgm.fr/)

[Zendjebil, Regard' 08]

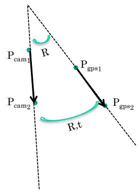
- Inertial/Camera calibration define a relationship between camera and inertial sensor.
  - Why ?
    - To deduce the camera's orientation from the orientation provided by the inertial sensor.
  - How ?



$R_{CW} = R_{CI} R_{IG} R_{GW}$

Projet ANR Raxenv (http://raxenv.brgm.fr/)

- **GPS/Camera calibration define the transformation to deduce the GPS position with respect to world reference frame.**
  - **Why ?**
    - ☞ **Deduce the camera's position from the GPS position**
  - **How ?**



$$p_{cam} = R p_{gps} + t$$

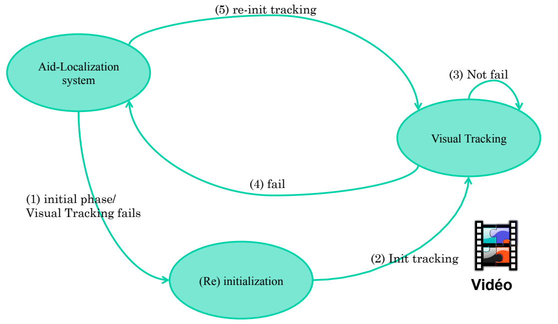
$$\sum_i^n \|p^i_{cam} - R p^i_{gps} + t\|^2 \Rightarrow \sum_i^{\frac{n}{2}} \|\overrightarrow{N}^i_{cam} - R\overrightarrow{N}^i_{gps}\|^2$$

$$\overrightarrow{N}^i_{gps} = p^j_{gps} - p^i_{gps}$$
$$\overrightarrow{N}^i_{cam} = p^j_{cam} - p^i_{cam}$$
$$i = 1..\tfrac{n}{2}$$
$$j = \tfrac{n}{2} + 1..n$$

Projet ANR Raxenv (http://raxenv.brgm.fr/)

- Deduce camera pose from the Aid-Localization subsystem data and transformations obtained by the calibration.
  - Simple.
  - Efficient.
  - Do not require heavy assumptions.

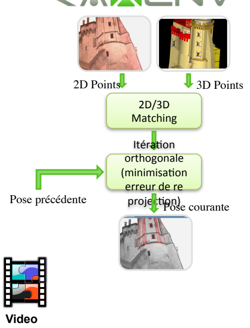
Projet ANR Raxenv (http://raxenv.brgm.fr/)



Projet ANR Raxenv (http://raxenv.brgm.fr/)

Scenario : Saumur Castle

> Vision based Tracking
- Pose Estimation :
  - Based on interests points.
  - 2D/3D matching
  - Pose Estimation(orthogonal Iteration).



ibisc

Projet ANR Raxenv (http://raxenv.brgm.fr/)

- The Aid-localization subsystem is less accurate than vision subsystem.
  - We need to quantify the quality of measurements and improve the estimation provided by the aid-localization subsystem.
- Our error = the difference with respect to the camera pose provided by vision subsystem.
- When the vision fails we need to predict this error
  - Record the offset between the hybrid sensor and camera pose during visual tracking.
  - Predict the offset made by hybrid sensor using Gaussian process when the visual tracking fails.
  - Improve the localization estimation.

RAXENV

ibisc

Digital Ocean

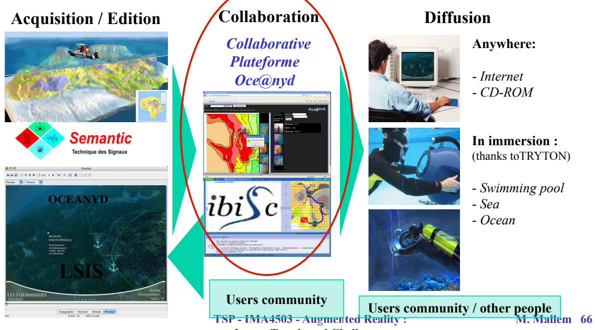
IBISC' Project : Digital Ocean:

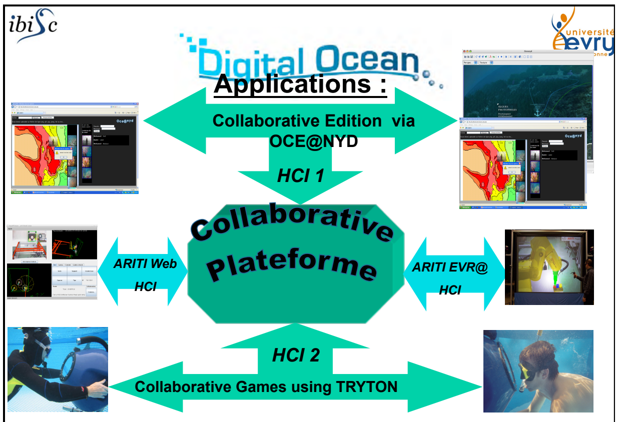
EU Project
Dec 2006 – June 2010

ibisc

Digital Ocean

De la création à la diffusion de contenus





Augmented Reality and Serious Games

Webography

- - http://lightblueoptics.com/
- - http://www.globalimagination.com/products.html
- - http://www.tomgerhardt.com/mudtub/
- - http://www.regarde.org/blog/2007/05/30/tactile/microsoft-surface/#more-645
- - http://www.jamespatten.com/audiopad/
- - http://squidpress.wordpress.com/category/portable-pixel-playground/ http://www.engadget.com/2009/06/14/asus-seamless-experience-is-the-best-conception-of-the-future/
- http://www.immersion.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=49%3Acubtile&catid=8%3Aprojet&Itemid=4&lang=fr
- http://www.media.mit.edu/research/highlights/sixthsense-wearable-gestural-interface-augment-our-world
- http://www.pranavmistry.com/projects/sixthsense/
- http://hci.rwth-aachen.de/slap
- http://www.marketing-professionnel.fr/tribune-libre/technologies-realite-augmentee-utilisation-marketing.html
- http://www.atelier.fr/cyber-culture/4/26022009/realite-augmentee-virtuel-webcam-total-immersion-37898-.html
- http://www.tomgerhardt.com/mudtub/
- http://www.marcelvanheist.com/
- http://www.in.tum.de/en/research/research-highlights/medical-augmented-reality.html

References

- **P. Milgram,** H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishino. **Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum**. In H. Das, editor, Proc. SPIE Vol. 2351, Telemanipulator and Telepresence Technologies, volume 2351 of Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, pages 282–292, December 1994.
- **BENFORD S,** GREENHALGH C, REYNARD G, BROWN C, KOLEVA B. - Understanding and Constructing Shared Spaces with Mixed-Reality Boundaries. ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI), Vol. 5 (3), p. 185-223, septembre(1998).
- **Ronald T. Azuma**. **A survey of augmented reality.** Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4):355–385, August 1997.
- **Oliver Bimber** and Ramesh Raskar. **Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds.** A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2005.
- **Mallem, M.** & Roussel, D. **Réalité augmentée. Principes, technologies et applications**, Techniques de l'Ingénieur, Technologies de l'Information, Le traitement du signal et ses applications (TE 5 920), 2008, 1,14

References

- Behzadan A., Kama V., « Visualization of construction graphics in outdoor augmented reality», Source Winter Simulation Conference, Proceedings of the 37th conference on Winter simulation, Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, p. 19141920, 2005.

Outline of talk

- Introduction
- Sensors modeling and calibrating
- Visual and Hybrid tracking
- AR Projects
- Conclusions and challenges

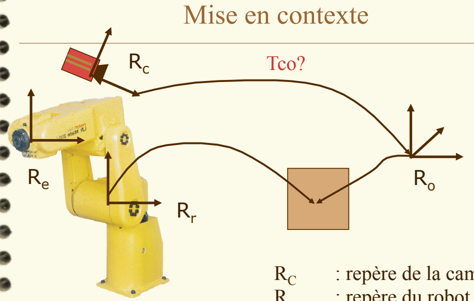
AR Challenges

- **Researchs :**
  - Software architecture for application prototyping
  - tracking and registration problem is one of the most fundamental challenges, which is still open.
  - Ubiquitous localization is also still open
  - 3D real time natural interaction

Vision 3D pour la réalité augmentée application à la robotique

✓ Plan du cours :
- 0. Introduction à la réalité augmentée,
- 1. **Modélisation et calibration de capteurs de vision 3D (Caméra(s))**

Vision 3D et robotique : Mise en contexte



R_C : repère de la caméra
R_r : repère du robot
Re : repère effecteur
R_o : repère environnement

Modélisation et calibration de capteurs/robot

Objectif :
si capteur =
- DR3D ➔ relevé 3D
- caméra ➔ superposition d'images
- robot ➔relevé 3D, calibration automatique de caméra

Pré-condition :

Points d'apprentissage

Post-condition :

Paramètres du modèle du capteur

Intérêt de la caméra :Calcul de position

L'objectif est de connaître la position d'un objet dans l'espace à partir de sa position dans l'image

Points image ⇨ Modèle de caméra ⇨ Points 3D

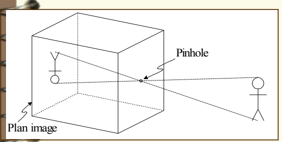
Paramètres du modèle

Calibration

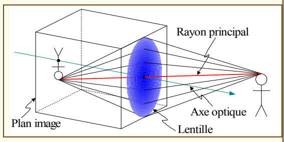
➢La calibration sert à déterminer les paramètres du modèle. Il est réalisé une seule fois

Formation des images

Sténopé (idéal)



Caméra réelle



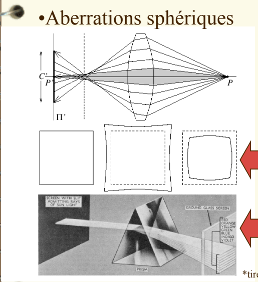
Problème : quantité de lumière insuffisante

Solution : utilisation d'une lentille

Formation des images

Problèmes reliés à l'utilisation d'une lentille :

•Aberrations sphériques

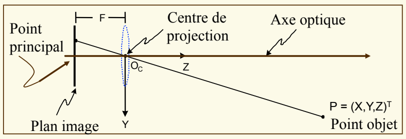


•Distorsion radiale:
- négative (pincushion)
- positive (barrel-type)

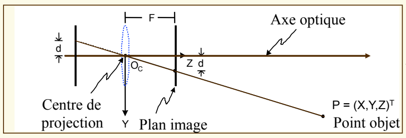
• Aberration chromatique : la cause

*tirée de Forsyth

Modèle du sténopé



Inverseur



Non-Inverseur

Modélisation géométrique de caméra: Hypothèses

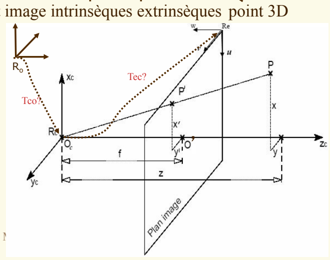
- Modèle linéaire à sténopé(« Pinhole ») [Abdel-Aziz 1971],
- Transformation perspective parfaite de centre *Oc* (centre optique de la caméra),
- La distance *OcO'* est la distance focale f de la caméra,
- L'axe optique *OcZc* intersecte le plan image en *O'* (centre de l'image)
- Les axes *Xc* et *Yc* sont perpendiculaires au plan image.

Modélisation d'une caméra : explication du modèle

Le modèle provient de la formule suivante :

$$\tilde{p} = \overbrace{\underbrace{T_{ec}}}^{M\,\text{int}}\;\overbrace{\underbrace{T_{co}}}^{M\text{ext}}\;\tilde{P}$$

point image intrinsèques extrinsèques point 3D

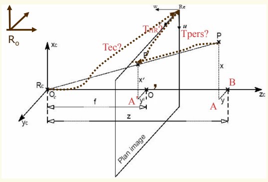


Modélisation géométrique de caméra : Modèle interne (Mint)

$$\tilde{p} = \overbrace{T_{HR}\,T_{pers}}^{M\,\mathrm{int}}\ \overbrace{T_{co}}^{Mext}\ \tilde{P}$$

point image intrinsèques extrinsèques point 3D

- Projection perspective du point P en P' exprimé dans Rc,
- Transformation de Rc dans Re(Rotation + homothétie).



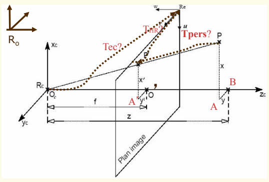
Modèle Sténopé : Projection perspective

1 – Tpers ? Projection perspective , exprimée dans Rc, de P(X Y Z)t en P'(X' Y' Z')t :
Pt 3D → Plan image

On a : $\frac{Y}{Z} = \frac{Y'}{f}$ → $\boxed{Y' = \frac{Yf}{Z}}$

De même en X : $\boxed{X' = \frac{Xf}{Z}}$

$\boxed{Z' = f}$



f : focale de la caméra

Modèle Sténopé : Projection perspective

1 – Projection, exprimée dans Rc, de P en P' :
Pt 3D → Plan image

$$\tilde{p} = T_{HR}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1/f & 0\end{bmatrix} T_{co}\ \tilde{P}$$

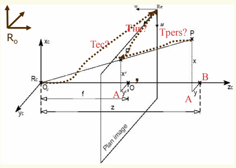
$$\begin{pmatrix}sX'\\ sY'\\ sZ'\\ s\end{pmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1/f & 0\end{bmatrix}\begin{pmatrix}X\\ Y\\ Z\\ 1\end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix}X'\\ Y'\\ Z'\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}f.X/Z\\ f.Y/Z\\ f\end{pmatrix}$$

Modèle Sténopé : Rotation et mis à l'échelle

2 – THR : Transformation de Rotation et de Mise à l'échelle du plan image (m → pixel)

$$\tilde{p} = \overbrace{T_{HR}T_{pers}}^{M\text{int}}\overbrace{T_{co}}^{Mext}\tilde{P}$$



$$P'_{Re} = T_{HR}P'_{Rc} + t_{ec}$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = T_{HR}\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{pmatrix}$$

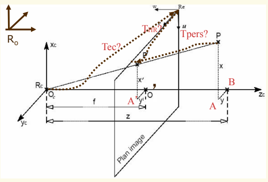
$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & 0 \\ 0 & k_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{pmatrix}$$

Ku et *Kv* : facteurs d'échelles, respectivement en abscisse et en ordonnée exprimés en pixels/m).
(uo et *vo)* coordonnées de O' dans Re
wo=0, car O' se trouve dans le plan image.

Modèle Sténopé : Rotation et mise à l'échelle

2 – THR : Transformation de Rotation et de Mise à l'échelle du plan image (m → pixel)

$$\tilde{p} = \begin{bmatrix} -k_u & 0 & 0 & u_o \\ 0 & k_v & 0 & v_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_{pers}T_{co}\tilde{P} \quad (2)$$



$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_u X' + u_0 \\ -k_v Y' + v_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Modélisation géométrique de caméra : Modèle interne (Mint)

$$\tilde{p} = \underbrace{\overbrace{T_{HR}T_{pers}}^{M\text{int}}}_{\text{intrinsèques}}\underbrace{\overbrace{T_{co}}^{Mext}}_{\text{extrinsèques}}\tilde{P}$$

point image intrinsèques extrinsèques point 3D

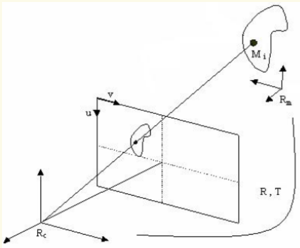
$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -k_u & 0 & 0 & u_o \\ 0 & k_v & 0 & v_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} Tco \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -k_u f & 0 & u_o & 0 \\ 0 & k_v f & v_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} Tco \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_o & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{Mint}} Tco \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

αu *: -ku.f (taille focale en pixels selon les abscisses*
αv *: -ku.f (taille focale en pixels selon les ordonnées*
*1/**ku** : dimension en abscisse du pixel (m/pixel)*
*1/**kv** : dimension en ordonnée du pixel (m/pixel)*
(uo,vo): *coordonnées pixels de la projection de Oc dans le plan image*

Modélisation géométrique de caméra : Modèle externe (Mext)

$$\tilde{p} = \underbrace{\overbrace{T_{HR}T_{pers}}^{M\text{int}}\overbrace{T_{co}}^{Mext}}\tilde{P}$$



- **Rotation R,**
- **Translation T.**

Modélisation géométrique de caméra : Modèle externe

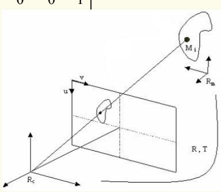
- **Le Modèle externe (*Mext*) est la composition des transformations R et T :**

$$\underset{(M_{ext})}{\begin{pmatrix} & R_{C/0} & & \begin{matrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{matrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}$$

Modélisation géométrique de caméra : Modèle externe

- 1 – Changement de repère Global → Caméra

$$\tilde{p} = T_{HR}T_{pers}\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tilde{P}$$



Modélisation d'une caméra : modèle global

Le modèle complet est alors :

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & \gamma & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

point image (pixel) — Mint — Mext — point 3D (en m)

$$\alpha_u = -k_u f ; \alpha_v = k_v f ; \gamma \approx 0$$

Modélisation d'une caméra : modèle global

- **La composition des modèles interne et externe donne le Modèle global *M*:**

$$M = \begin{bmatrix} \alpha_u r_{11} + u_0 r_{31} & \alpha_u r_{12} + u_0 r_{32} & \alpha_u r_{13} + u_0 r_{33} & \alpha_u t_x + u_0 t_z \\ \alpha_v r_{21} + v_0 r_{31} & \alpha_v r_{22} + v_0 r_{32} & \alpha_v r_{23} + v_0 r_{33} & \alpha_v t_y + v_0 t_z \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \alpha_u r_1 + u_0 r_3 & \alpha_u t_x + u_0 t_z \\ \alpha_v r_2 + v_0 r_3 & \alpha_v t_y + v_0 t_z \\ r_3 & t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_{14} \\ m_2 & m_{24} \\ m_3 & m_{34} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$avec : r_i = (r_{i1}\, r_{i2} \quad r_{i3}) \;\; et \;\; m_i = (m_{i1}\, m_{i2} \quad m_{i3}), i = 1,2,3$$

Modélisation géométrique de caméra : Modèle global

- **Le calcul des paramètres intrinsèques et extrinsèques s' obtient en identifiant le modèle global *M* avec les modèles *Mint* et *Mext* :**

$$\begin{cases} \boldsymbol{r_3} = \boldsymbol{m_3} \\ u_0 = \boldsymbol{m_1}.\boldsymbol{m_3} \\ v_0 = \boldsymbol{m_2}.\boldsymbol{m_3} \\ \alpha_u = -\|\boldsymbol{m_1} \times \boldsymbol{m_3}\| \\ \alpha_v = \|\boldsymbol{m_2} \times \boldsymbol{m_3}\| \\ \boldsymbol{r_1} = \dfrac{1}{\alpha_u}(\boldsymbol{m_1} - u_0.\boldsymbol{m_3}) \\ \boldsymbol{r_2} = \dfrac{1}{\alpha_u}(\boldsymbol{m_2} - u_0.\boldsymbol{m_3}) \\ t_x = \dfrac{1}{\alpha_u}(m_{14} - u_0.m_{34}) \\ t_y = \dfrac{1}{\alpha_u}(m_{24} - u_0.m_{34}) \\ t_z = m_{34} \end{cases} \quad \textbf{(5)}$$

Modélisation d'une caméra : application du modèle global

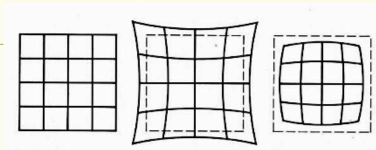
$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = M\text{int}\ \ Mext \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_{14} \\ m_2 & m_{24} \\ m_3 & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} u = {P^t m_1 + m_{14}} \big/ {P^t m_3 + m_{34}} \\ v = {P^t m_2 + m_{24}} \big/ {P^t m_3 + m_{34}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} P^t.n_u + a_u = 0 \\ P^t.n_v + a_v = 0 \end{cases}, \ avec\ n_u = m_1 - u.m_3 \quad n_v = m_2 - v.m_3 \quad a_u = m_{14} - u.m_{34} \quad a_v = m_{24} - v.m_{34}$$

(6) Représente l' équation du rayon visuel porteur de P et de son image et passant par Oc.

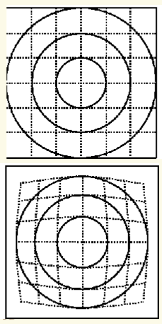
Distorsion Radiale



Pas de distorsion coussinet Barrillet

- ✓ Distorsion radiale de l'image
  - Causée par les imperfections de la lentille
  - Les distorsions sont importantes sur les bords de l'image

Distorsion Radiale - Exemple



Modélisation géométrique de caméra : Modélisation des distorsions

- (3) suppose que le modèle de la caméra est linéaire.

Physiquement il existent des distorsions optiques (radiales) :

- **(3) devient :**

$$\begin{cases} u = \alpha_u . x + u_0 + \Delta u \\ v = \alpha_v . y + v_0 + \Delta v \end{cases} \quad \textbf{(3b)}$$

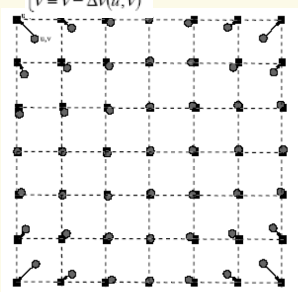
avec

$$\begin{cases} \Delta u = k((u-u_0)^2 + (v-v_0)^2)(u-u_0) \\ \Delta v = k((u-u_0)^2 + (v-v_0)^2)(v-v_0) \end{cases}$$

Modélisation géométrique de caméra : Modélisation des distorsions

- **Distorsion radiale**

$$\begin{cases} u' = u - \Delta u(u,v) \\ v' = v - \Delta v(u,v) \end{cases}$$

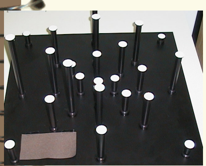
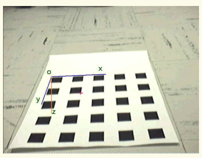
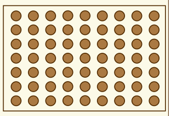


Calibration d'une caméra : procédure (principe général)

1. Placer une cible d'étalonnage devant la caméra
2. Repérer la position de chaque marqueur de la cible dans l'image

➢ On obtient une liste de coordonnées 3D (Global) accompagnées de leur projection dans l'image

$$\begin{bmatrix} [u_1 & v_1] \\ [u_2 & v_2] \\ \vdots & \\ [u_N & v_N] \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} [X_1 & Y_1 & Z_1] \\ [X_2 & Y_2 & Z_2] \\ & \vdots & \\ [X_N & Y_N & Z_N] \end{bmatrix}$$

Calibration d'une caméra : procédure (idée générale)

1. Placer une cible d'étalonnage devant la caméra
2. Repérer la position de chaque marqueur de la cible dans l'image
   - ➢ On obtient une liste de coordonnées 3D (global) accompagnées de leur projection dans l'image

$$\begin{bmatrix} [u_1 & v_1] \\ [u_2 & v_2] \\ \vdots & \\ [u_N & v_N] \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} [X_1 & Y_1 & Z_1] \\ [X_2 & Y_2 & Z_2] \\ & \vdots & \\ [X_N & Y_N & Z_N] \end{bmatrix}$$

3. Chaque pt nous donne 2 équations de plans et on a 11 inconnues (5 intr. + 6 extr. car il y a 6 contraintes sur R)
4. On construit un système d'équations linéaires qu'on peut résoudre à l'aide des techniques d'algèbre linéaire standards (moindre carrés) -> m_{ij}
5. On extrait, s'il y a lieu, les paramètres explicites α, β, t_x …

Calibration de caméra Estimation des mij

•Le modèle global *M* permet d'exprimer les coordonnées images d'un point *P* de la scène 3D, (6) s'écrit aussi :

$$\begin{cases} u = \dfrac{m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14}}{m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}} \\ v = \dfrac{m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24}}{m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}} \end{cases} \quad \textbf{(6)}$$

•Calibrer la caméra revient à estimer les 12 coefficients de *M* :

6 points minimum, non tous coplanaires, sont alors requis.

•Le système précédent peut s'écrire pour chaque point *Pi*:

$$\begin{matrix} m_{11}x_i + m_{12}y_i + m_{13}z_i + m_{14} - u_i m_{31}x_i - u_i m_{32}y_i - u_i m_{33}z_i = u_i m_{34} \\ m_{21}x_i + m_{22}y_i + m_{23}z_i + m_{24} - v_i m_{31}x_i - v_i m_{32}y_i - v_i m_{33}z_i = v_i m_{34} \end{matrix} \quad \textbf{(7)}$$

Calibration de caméra Estimation des mij

•On obtient alors 2N équations pour N points, la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} & & & & & & \vdots & & & & \\ x_i & y_i & z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i x_i & -u_i y_i & -u_i z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_i & y_i & z_i & 1 & -v_i x_i & -v_i y_i & -v_i z_i \\ & & & & & & \vdots & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ u_i m_{34} \\ v_i m_{34} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \textbf{(8)}$$

•Il s'agit d'un système linéaire de la forme : $H.m = p$

•Une solution au sens des moindres carrées donne :

$$m = (H^t.H)^{-1}.H^t.p \quad \textbf{(9)}$$

Calibration de caméra
Estimation des mij

- Identification du modèle sténopé linéaire(sans distorsions) :Optimisation au sens des moindres carrés:

$$\tilde{p} = H \; m$$

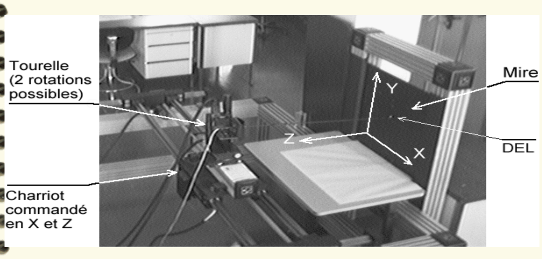
$$m = (m_{11}, m_{12}, m_{13}, \dots, m_{33})^t$$

où $\tilde{p}$ est l'échantillon des N points images mesurés, et H, la matrice de mesures (2N lignes, 11 colonnes)

Le vecteur m est identifié en minimisant le critère suivant :

$$Critere = Min\left\| (H.\hat{m} - \tilde{p}) \right\|^2$$

Banc de Calibration



- Calibration manuelle : montage, temps, précision,
- Calibration automatique basée sur celle du robot

Calibration automatique de caméra

Conditions expérimentales :

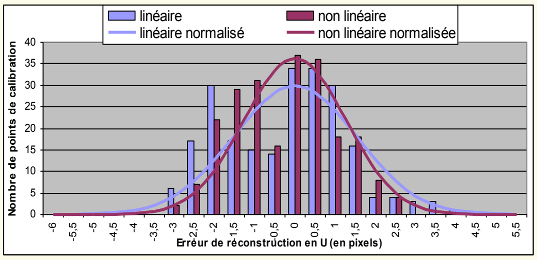
- Caméra CCD:- focale 25 mm,définition:756x581 photoéléments.
- Caméra à tube:- focale 25 mm.
- Distance caméra-plans de calibration : 1-2mètres.
- Définition de la carte graphique : 768x576 pixels.
- Robot à 4 d.d.l.(PPRR)($\Delta\theta$=1/100°, ΔX=1/10 mm).

Calibration automatique de caméra

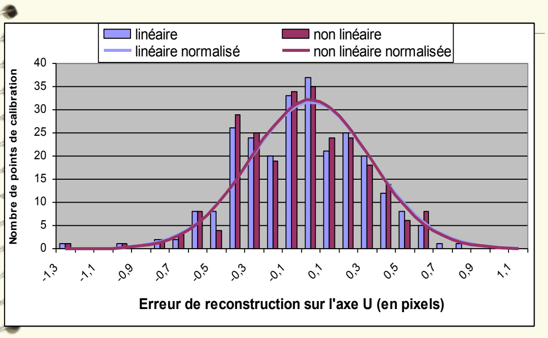
Protocole expérimental :

1 - Calibration du mini robot / à la mire.
2 - Pré calibration de la caméra → le champ visuel de la caméra.
3 - Calibration automatique de la caméra.

Résultats de la caméra à tube



Résultats de la caméra CCD



Calibration automatique de caméra : apports

- Evaluation rapide et précise de modèles de caméra .

- Non utilisation d'un objet étalon.

- Calibration automatique si caméra en mouvement.

Calibration d'une caméra :Notes sur les techniques d'étalonnage (1/2)

- Il existe plusieurs techniques d'étalonnage
  - *Zhang, Tsai, Heikkilä, Faugeras, etc.*
- Le type de cible et le modèle de la caméra utilisé changent
- Le système d'équations à résoudre diffère en fonction de ces variantes
- L'idée est toujours la même : trouver les paramètres permettant de faire le "mapping" entre les points de l'espace et leur position dans l'image.

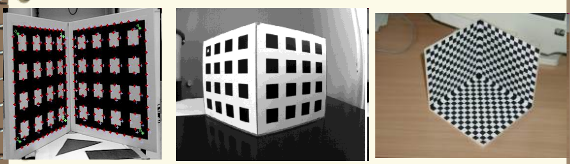
Calibration d'une caméra : Notes sur les techniques d'étalonnage (2/2)

Prise en compte de la distorsion des lentilles

- La plupart des techniques incluent des paramètres de distorsion dans leur modèle.
- L'ajout de ces paramètres rend le système à résoudre non-linéaire.
- On procède alors en 2 étapes :
  1. En supposant la distorsion nulle, on résout le système linéaire
  2. Partant de cette estimation initiale, on détermine les paramètres de distorsion à l'aide de techniques d'optimisation non-linéaires

Calibration Planaire [Zhang 1999]

- ✓ Dans les méthodes précédentes, la calibration exigeait que tous les points ne soient pas co planaires. Les exemples de mires utilisées sont données ci-dessous :



Note:Une telle armada, n'est pas forcément nécessaire !

Calibration Planaire [Zhang 1999]

- ✓ L'idée est de proposer une méthode de calibration qui permet une calibration en s'affranchissant de la conception de mires complexes.
- ✓ Une grille plane imprimée en N/B sur une feuille de papier et montrée sous plusieurs vues à la caméra suffit. Le mouvement de la caméra ou de la grille n'est pas à connaître.
- ✓ Les paramètres extrinsèques sont estimés relativement au référentiel lié à la grille de calibration.
- ✓ Claim to Fame: est un outil basé sur l'algorithme de Zhang et utilisé par MS Research. Matlab Camera Calibration Toolbox utilise également cet algorithme.

Étalonnage de votre caméra :méthode de Zhang ou celle disponible dans OpenCV

Caractéristiques de la technique de Zhang

- ✓ Simple, robuste et précise
- ✓ Utilise une cible plane
- ✓ Nécessite au moins trois prises de vue (non coplanaires) à cause des paramètres intrinsèques
- ✓ Prend en compte la distorsion des lentilles

Procédure à suivre :

- ✓ Procédure d'étalonnage de Zhang

Méthodes de calibration géométrique avec code disponible sur internet

- ✓ Zhengyou Zhang (Microsoft research)

http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/calib/

- ✓ Janne Heikkila (Oulu Univ.)

http://www.ee.oulu.fi/~jth/calibr/

- ✓ Lien potentiellement intéressant (pour travaux pratiques):

http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/links.html

Bibliographie

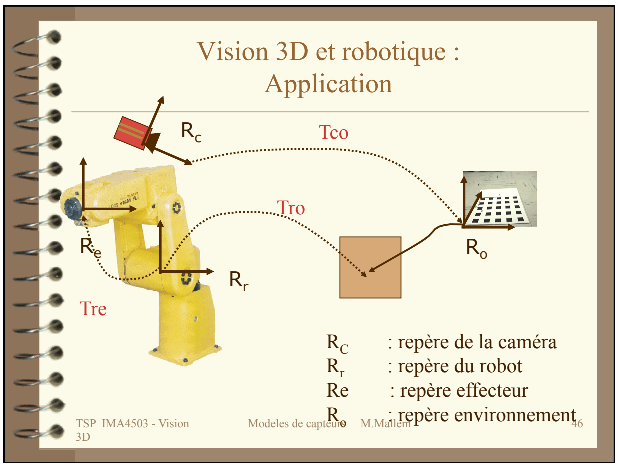
•[Abdel-Aziz et Karara, 1971] Y.I Abdel-Aziz et H.M. Karara (1971). Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. In Proceedings of the ASP/UI Symposium on Close-Range photogrammetry, pages 1–18, Urbana. University of Illinois at Urbana-Champaign.

•[Tsai, 1987] R. Y. Tsai (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-3(4) :323–344.

•[Zhang, 1999] Z. Zhang (1999). Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. in International Conference on Computer Vision, volume 1, page 666, Corfu, Greece.

Questions sur le cours

Q1 : Calculer les paramètres globaux mij (i=1..3 ; j=1..4) en fonction des paramètres intrinsèques et extrinsèques tels que définis dans le cours.
Q2 : Quelles est la signification physique de m34.
Q3 : Quelle est la condition utilisée pour l' estimation des mij au sens de la méthode des moindres carrés.
Q4 : Calculer uo et vo en fonction des mij.


Vision 3D et robotique :
Application
Rc
Tco
Tro
Re
Rr
Ro
Tre
RC : repère de la caméra
Rr : repère du robot
Re : repère effecteur
Ro : repère environnement
TSP IMA4503 - Vision 3D
Modeles de capteurs
M.Mallem
46