F - Capteurs de localisation

L'objectif de ce chapitre est de présenter les capteurs permettant une **localisation en temps réel** de tout objet pour le positionnement et(ou) le suivi de sa trajectoire. Ce sont des interfaces motrices indispensables pour les techniques de réalité virtuelle. Dans ce domaine, l'objet à localiser est souvent une partie du corps, tout le corps ou un objet manipulé par l'utilisateur (cf chapitre sur les gants de données et exosquelettes).
Quand ils sont employés pour la réalité virtuelle, on nomme ces capteurs des «traqueur».
Ces capteurs sont conçus pour mesurer seulement la position spatiale d'un repère mobile, lié à l'objet observé, par rapport à un repère fixe.
En parlant de visiocasques, de gants de données, d'exosquelettes, de combinaisons de données, de souris et trackball 3D, ... j'ai fait souvent référence à ces capteurs.
Eh bien, c'est maintenant que je détaille leurs principes techniques.

Le positionnement d'un repère lié à un objet est parfaitement déterminé si le traqueur permet de mesurer les 6 paramètres (3 angles et 3 distances) liés aux 6 ddl du repère.
Ces 6 paramètres sont définis par la matrice de transformation géométrique entre le repère lié à l'environnement et le repère lié à l'objet. Cette transformation est composée d'une rotation et d'une translation. Les paramètres peuvent être définis de différentes façons, et en général les systèmes de mesure laissent à l'utilisateur le choix entre les différentes représentations. Le capteur de positionnement est soit lié à l'objet ou soit immobile par rapport à l'environnement. Dans ce dernier cas, c'est par l'observation de l'objet que le capteur détermine les paramètres de localisation. Le traqueur parfait (ou «presque parfait» en ne tenant pas compte du prix) n'existe pas.
Les techniques de réalité virtuelle sont pourtant très demandeuses de ce type d'interface. Mais concevoir et réaliser un capteur de localisation bon marché qui fournisse en temps réel (à une fréquence supérieure à 100 Hz) six mesures très précises, sans contraintes d'exploitation, est un challenge technique très difficile. Il peut être étonnant qu'à notre époque aux techniques très évoluées, donner six mesures en temps réel semble très complexe.
C'est sous l'essor de la réalité virtuelle que sont apparus les capteurs de localisation les plus évolués pour :
- la localisation de la tête de l'utilisateur portant un visiocasque ;
- la localisation (6 ddl) de l'extrémité de la main permettant de manipuler un objet virtuel ou de diriger *naturellement* un curseur dans un environnement virtuel ;
- la localisation d'une partie du corps, utilisée entre autres, pour la «motion capture»

Les véritables capteurs de localisation spatiale déterminent normalement les 6 paramètres liés aux 6 ddl. Par contre certains capteurs ne mesurent que 3 paramètres :
- les 3 coordonnées liées à la translation de l'objet par rapport au référentiel ;
- les 3 coordonnées liées à la rotation de l'objet ;
- les 3 coordonnées liées à la localisation dans un plan.

Ce chapitre ne présente pas les simples capteurs de mesure de distance ou d'orientation angulaire bien qu'à partir d'un ensemble de ce type de matériel, il soit toujours possible de déterminer la position spatiale d'un objet en mesurant plusieurs de ses points par rapport à un référentiel (méthode de triangulation).
De même, ce chapitre ne couvrira pas les capteurs de «navigation» permettant la localisation terrestre (ne nous intéressant pas dans le cadre des jeux vidéos),
Ne seront donc présentés que les capteurs localisant un objet dans une zone restreinte, telle que l'espace environnant d'un ordinateur ou d'une pièce (quelques cm à quelques dm).

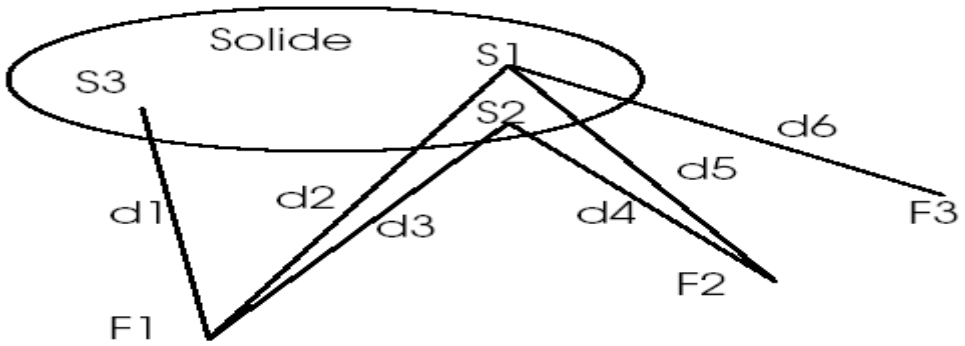
Bien, je viens d'indiquer qu'un traqueur peut servir à manipuler un objet virtuel ou à diriger un curseur dans un environnement virtuel. Dans le premier cas, l'utilisateur agit *«naturellement»* sur le monde virtuel, le traqueur se contentant de suivre le mouvement de sa main. Dans le deuxième cas, il s'agit en général de commander une action spécifique (par exemple, se déplacer dans le monde virtuel en indiquant une direction, pointer sur un menu déroulant, commander symboliquement l'ouverture d'une porte, ...). Dans ce deuxième cas, les traqueurs peuvent être remplacés par *des interfaces de commande* classiques (joysticks, souris, ...).
Celles-ci, posées en général sur une table, permettent à l'utilisateur de commander manuellement le déplacement d'un curseur grâce aux mouvements relatifs de l'interface par rapport à une position neutre.Ces mouvements ont de faibles courses (quelques mm à quelques cm).
Il ne s'agit donc pas là de localisation dans l'espace, mais de commande motrice relative (c'est le cas des souris 3D et joysticks avec lesquels le curseur est mû grâce à une action manuelle, réfléchie et peu naturelle de l'utilisateur (sauf pour les habitués de ce type d'interface)

F - 1 Principes de positionnements

Avant de présenter les phénomènes physiques qui régissent les différents types de traqueurs, voici explicité les principes géométriques de positionnement qu'ils exploitent.

PRINCIPE PAR MESURES DE DISTANCE ENTRE POINTS

La mesure de localisation d'un solide indéformable (6 ddl) peut être déterminée au minimum à partir des positions de trois points S1 , S2 et S3 non alignés du solide. La position du point S1 est calculable par triangulation grâce à trois distances mesurées entre ce point S1 et trois points fixes F1 , F2 et F3 liés au repère de référence. La position du point S2 peut être déterminée par deux distances au minimum avec deux points Fi , car la distance entre S1 et S2 est connue, et de même pour S3 une seule distance reste à déterminer avec un point Fi
Dans ce cas minimum de six mesures, on peut calculer les 6 ddl du solide. Mais concrètement, si nous pouvons mesurer trois distances pour le point S1 , nous pouvons le faire aussi facilement matériellement avec les deux autres. Nous obtenons alors un système de neuf équations à six inconnues, dont nous établissons la solution par minimisation des erreurs.
De plus la mesure concrète des distances peut introduire parfois une inconnue complémentaire, (la vitesse du son dans l'air peut être considérée comme une variable complémentaire dans les méthodes à ultrasons). Nous avons dans ce cas un système de neuf équations à sept inconnues



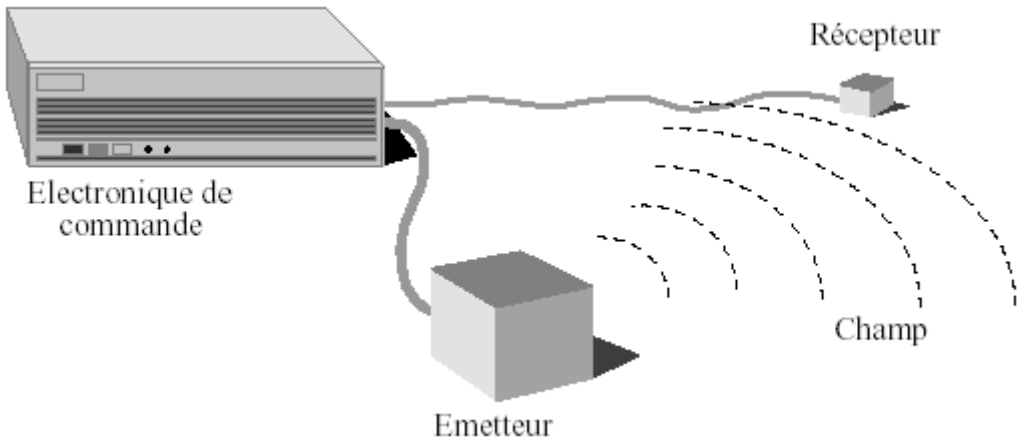
En conclusion pour ce principe, il s'agit de pouvoir mesurer physiquement des distances entre points. Toute personne peut mettre en oeuvre elle-même ce dispositif avec de simples capteurs de mesure de distance.

Mais des constructeurs proposent de tels capteurs de localisation bien optimisés, il est donc vain d'en concevoir d'autres, sauf pour des applications bien spécifiques.
Ce principe est employé dans les traqueurs à ultrasons, les traqueurs optiques et les traqueurs mécaniques à câbles.

PRINCIPE DE MESURE AVEC SOURCE EMETTRICE

Une source émettrice fixe crée un champ variable d'une grandeur physique dans son espace environnant. Un récepteur lié à l'objet à localiser mesure ce champ, dont les valeurs sont fonction de la position spatiale de l'objet.
Ce principe est utilisé dans les traqueurs électromagnétiques.

Remarque : le récepteur peut théoriquement être fixe et la source liée à l'objet observé. Mais pour des raisons de poids et d'encombrement, la source est généralement fixe.



PRINCIPE DE MESURE SANS SOURCE ªMETTRICE ARTIFICIELLE

Il n'y a pas de source émettrice artificielle créant un champ, ce qui facilite la technique de mesure. On peut exploiter les champs gravitationnel ou magnétique du globe terrestre, qui est ici la source émettrice naturelle. Dans ce cas, on détermine les modifications d'orientation par rapport aux lignes du champ, permettant de retrouver l'orientation du capteur. On peut aussi exploiter le principe du gyroscope : l'immobilité dans l'espace de l'axe de rotation d'une masse tournant à grande vitesse.

PRINCIPE DE MESURE DE CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT

Si on connaît en temps réel les vitesses de rotation d'un objet, on peut déterminer son orientation à chaque instant à partir de son orientation initiale (gyromètre). Si on mesure en temps réel les accélérations d'un objet en translation, il suffit de connaître sa position et sa vitesse initiales pour connaître sa position tridimensionnelle (3ddl) à chaque instant (accéléromètre). Par intégration simple (gyromètre) ou double (accéléromètre), on obtient la position mais les erreurs sont amplifiées par ces intégrations.

PRINCIPE PAR MESURES D'ANGLES ENTRE SOLIDES

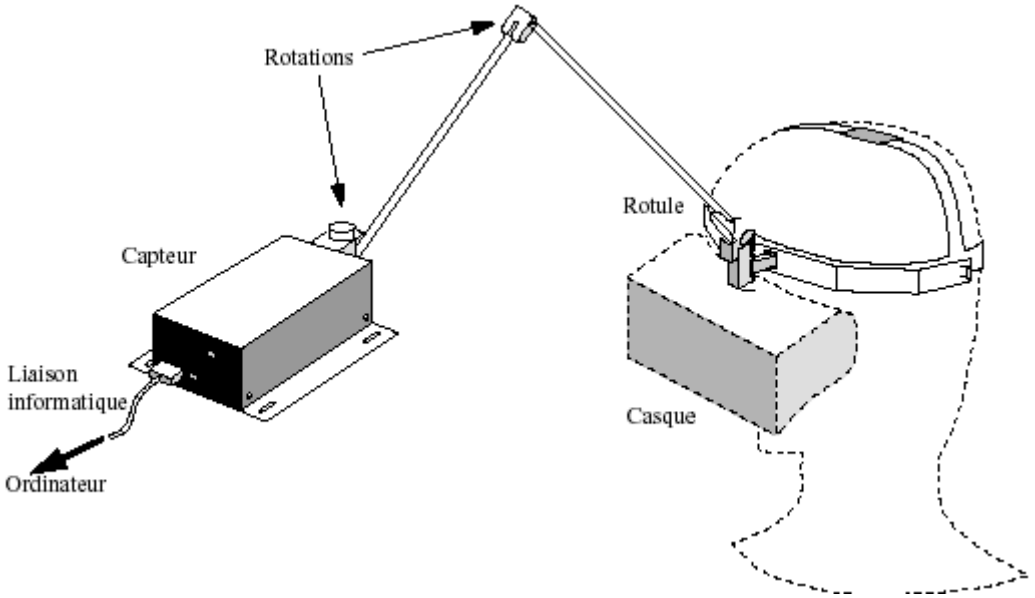
Cette méthode est évidemment exploitée pour les traqueurs mécaniques avec lesquels il existe en permanence une liaison entre l'objet détecté et son environnement. Pour laisser 6 ddl à l'objet

(ou 3 ddl à un point), la liaison est réalisée par un ensemble de barres ayant des liaisons pivot entre elles. Il suffit de mesurer six angles (ou trois) pour déterminer la position de l'objet. Certains capteurs optiques sont aussi basés sur des mesures d'angles.
Les principes physiques exploités actuellement sont variés, chacun ayant au moins un avantage par rapport aux autres. Les phénomènes physiques exploités sont la mécanique, l'électromagnétisme, l'acoustique, et l'optique.

F - 2 Traqueurs mécanique

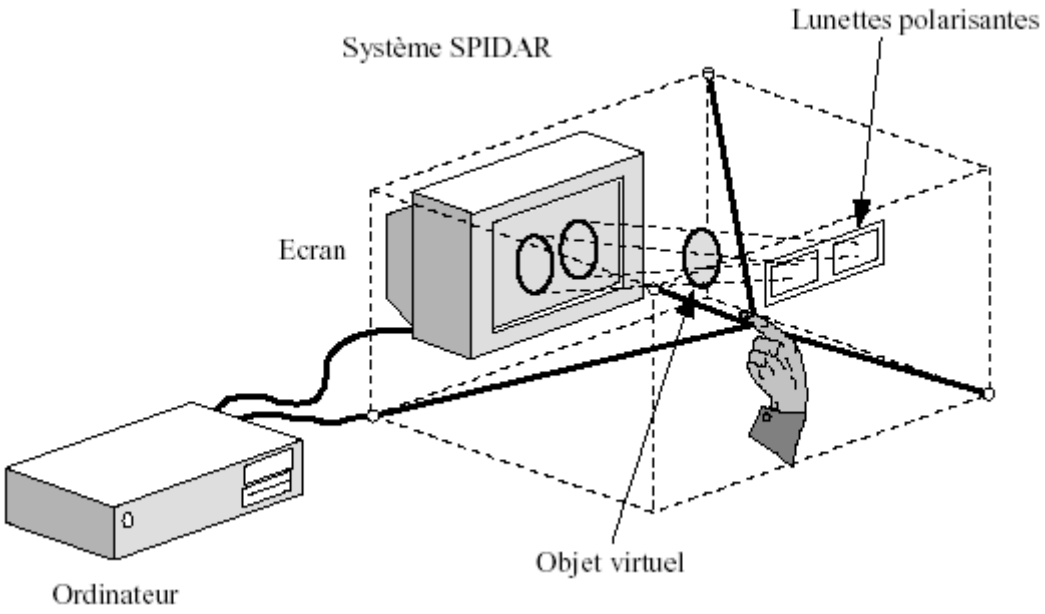
TRAQUEURS MÉCANIQUES MESURANT DES DISTANCES

Avec ce type de traqueur, il existe en permanence une liaison mécanique entre l'objet détecté et son environnement tout en laissant 6 ddl à l'objet ou 3 ddl à un point.
En général, la liaison mécanique est composée d'une chaîne de trois barres articulées à l'extrémité de laquelle se trouve une rotule permettant une orientation angulaire à 3 ddl .



L'architecture mécanique est souvent identique à celle de robots manufacturiers, mais en plus légère pour supprimer le plus possible les contraintes de mouvement et d'inertie de l'objet observé.
Les mouvements relatifs entre les pièces mécaniques sont des rotations. Celles-ci sont mesurées grâce à des potentiomètres ou des capteurs optiques incrémentaux. Ces mesures aisées procurent les principaux avantages de ce type d'appareil. Les mesures sont précises, très rapides (jusqu'à 300 mesures par seconde) et le temps de réponse est très court (2 à 3 ms). Le prix relativement faible est un autre avantage. Par contre, le seul inconvénient majeur, inhérent à ce principe, est la contrainte de liberté de mouvement : l'étendue de mesure est limitée et le capteur crée des obstacles aux déplacements de l'objet observé. Ce type de traqueur est principalement exploité pour mesurer le mouvement de la tête, mais il peut enregistrer des mouvements d'objet quelconque. Il y a peu de développement sur ce type de traqueur, qui sont peu exploités, malgré leur qualité métrologique intrinsèque. Mais ils font si peu «high tech» qu'on hésite à les utiliser (ou à en concevoir pour des applications spécifiques). Si la tête de l'utilisateur se déplace peu, ces traqueurs mécaniques sont tout de même à considérer attentivement comme solution, car ils ont les meilleures caractéristiques métrologiques.
Toujours basé sur des mesures mécaniques de distances, différents traqueurs mécaniques ont été conçus dans le passé. La présentation de solutions variées qui va suivre est plutôt écrite pour

montrer au lecteur que des solutions originales peuvent être réalisées, que pour en faire un inventaire exhaustif.
Un principe mécanique original a été envisagé pour détecter le déplacement de la tête d'une personne portant un visiocasque.
Le dessus du visiocasque est relié par quatre câbles aux quatre coins d'une salle. Les câbles sont toujours légèrement tendus par des moteurs électriques. En mesurant leurs rotations, on peut connaître les distances entre le sommet du visiocasque et les quatre coins de la salle. La rotation autour de l'axe vertical du visiocasque est toujours possible car les quatre câbles sont fixés sur une petite plaque pouvant tourner relativement au visiocasque. Cette rotation est aussi mesurée. Avec ces cinq mesures, on peut calculer les déplacements dans la salle et la rotation verticale. Le principal inconvénient du dispositif est l'obligation d'équiper la salle et d'étalonner le dispositif. Celui-ci n'est pas commercialisé.
Un prototype similaire (Spidar II) à plusieurs fils est employé par Hirata, pour mesurer les mouvements de translation de l'extrémité d'un doigt (3 ddl). Celle-ci est attachée à quatre fils reliés à quatre moteurs-encodeurs qui maintiennent une tension sur les fils. Le doigt peut se mouvoir dans un volume d'un mètre cube environ (voir ci dessus). Grâce aux encodeurs, on relève à chaque instant la longueur des parties déroulées des fils et on détermine géométriquement la position du doigt. Les moteurs peuvent appliquer une tension variable aux fils, ce qui donne aussi en complément une interface originale à retour d'effort. Le dispositif peut être utilisé avec deux doigts, en doublant les fils et les moteurs-encodeurs. Mais dans ce cas, il y a évidemment des incompatibilités de mouvement entre les deux doigts.



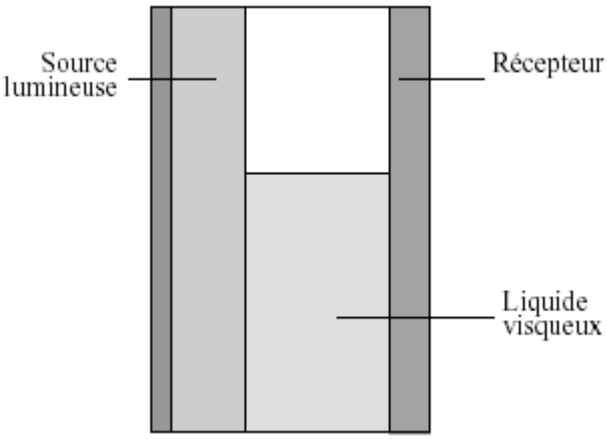
CAPTEURS MECANIQUES DETERMINANT UNE ORIENTATION, UNE VITESSE OU UNE ACCELERATION

Plusieurs types de traqueurs mécaniques sont regroupés sous cette même partie car ils sont basés sur des principes mécaniques ne fournissant, directement ou indirectement, la mesure d'un ddl. Ils font donc les associer entre eux ou avec d'autres traqueurs «non-mécaniques» pour réaliser des capteurs de localisation à 3 ou 6 ddl.
Certains commencent à apparaître sur des visiocasques à faible prix. Ils sont rarement vendus séparément, mais ils sont associés pour donner des traqueurs à 3 ou 6 ddl. Ils ont l'avantage d'avoir moins de limitation dans l'étendue de mesure, à l'inverse de la plupart des autres

traqueurs. Les différents types de capteurs mécaniques exploités pour la réalité virtuelle sont les inclinomètres, les gyroscopes et gyromètres et les accéléromètres.

Inclinomètres

Pour ce type de traqueur, c'est la terre qui est la source émettrice du champ gravitationnel. Sans mouvement de l'inclinomètre, il indique sa position angulaire avec la verticale du lieu. Mais s'il y a mouvement, il indique la direction de la force extérieure totale sur lui, due à l'accélération du mouvement et à l'attraction terrestre. Un constructeur propose un inclinomètre basé sur le principe d'un contenant parallélépipédique rempli de liquide visqueux. Sur une face, il y a émission de lumière qui est recueillie sur la face opposée, en quantité fonction de l'angle d'inclinaison.



Gyroscopes et gyromètres

Le plus commun des gyroscopes est celui basé sur le principe mécanique d'un rotor tournant à grande vitesse, dont l'axe garde une direction constante. Mais d'autres phénomènes physiques sont exploités pour mesurer des vitesses angulaires de rotation.
Ne seront présentés que les appareils susceptibles d'être miniaturisés et d'un coût acceptable pour être utilisés en réalité virtuelle.
Le gyroscope à suspension de Cardan est un dispositif indiquant une direction constante grâce à une masse (toupie) en rotation autour de son axe de révolution. La toupie du gyroscope est reliée au niveau de son centre d'inertie à une suspension de cardan qui permet à la toupie de s'orienter dans toutes les directions. Les frottements au niveau des liaisons sont réduits au minimum. On prévoit souvent un moteur entraînant la toupie pour corriger la dérive. Le principe de fonctionnement repose sur la propriété suivante (l'approximation gyroscopique) : étant donnée une masse de révolution d'axe Δ ayant une vitesse angulaire relativement grande autour de Δ, on admet que le moment cinétique de cette masse reste parallèle à Δ.
Par application du théorème du moment cinétique, on trouve que la direction de Δ est fixe. En théorie, un gyroscope pointe donc toujours dans la même direction. En pratique, cela est difficile à réaliser à cause des frottements au niveau de la suspension. Beaucoup d'appareils ne mesurent pas l'angle de rotation du support par rapport à l'axe Δ, mais sa vitesse angulaire de rotation : le gyromètre. La mesure de localisation de l'objet en mouvement est obtenue à partir de la vitesse par intégration, d'où une augmentation des erreurs de position dans le temps.
Ces capteurs ont le défaut d'avoir une dérive dans le temps, de l'ordre de plusieurs degrés par minute. Mais dans les applications en réalité virtuelle, telles que la mesure de rotation de la tête, il est plus important de connaître la rotation relative que la rotation absolue. Le poids peut être inférieur à 50 g tout en gardant une bonne résolution pour le traqueur.
Le gyroscope piézoélectrique de la société *Murata* est basé sur le principe de l'effet Coriolis. Il consiste en un petit prisme triangulaire piézoélectrique, avec une excitation sur une face et réception sur les deux autres. L'excitateur fournit des impulsions périodiques qui sont recueillies en réception sur les deux autres faces de façon identique quand l'appareil est au repos.

Un quelconque mouvement de rotation du prisme produit des forces de Coriolis qui causent une augmentation d'amplitude du signal de réception sur un détecteur par rapport à l'autre. La différence entre les deux détecteurs est proportionnelle à la vitesse de rotation. Celle-ci doit donc être intégrée pour obtenir la rotation angulaire, avec les problèmes inhérents à cette méthode : la dérive des mesures implique de faire un recalage, si on a besoin d'une mesure absolue de position.

Le traqueur gyroscopique de la société VR Systems exploite deux de ces appareils.

Il existe d'autres principes de gyroscopes comme les gyroscopes à lames vibrantes (à diapason), mais ceux-ci ne sont pas employés actuellement dans les dispositifs de réalité virtuelle.

Une exploitation intéressante d'un gyroscope peut servir de traqueur à 3 ddl qui se tient dans la main. L'utilisateur peut ainsi manipuler aisément en rotation un objet virtuel.

C'est par exemple le cas du traqueur «Gyropoint II Pro» de IXMicro Gyropoint.

Ce capteur est «sans fil» et est basé sur des gyroscopes à «état solide».



Le traqueur Gyropoint II Pro sans fil de IXMicro Gyropoint,

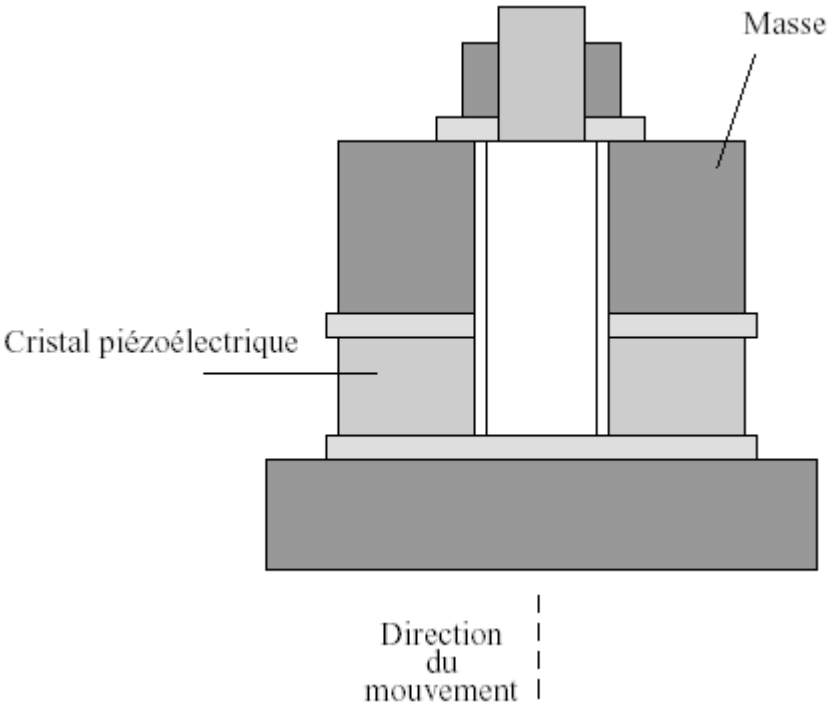
© photo IXMicro Gyropoint

<u>Accéléromètres</u>

Les accéléromètres sont basés sur la mesure d'une force provenant de l'accélération d'une masse. Les accéléromètres peuvent être en boucle ouverte ou en boucle fermée :

- pour la mesure en boucle ouverte, la force est mesurée par le faible allongement d'un ressort supportant la masse. Cette mesure est détectée par principe piézoélectrique, piézorésistif, à jauges de contrainte ou à variation de capacité.
- Pour ce type d'accéléromètre en boucle ouverte, il y a le problème classique de compromis à faire entre précision et rapidité de réponse. Pour les accéléromètres en boucle fermée, on crée une force opposée à la force inertielle, annulant le déplacement de la masse. Cette force d'opposition est créée par un système moteur dont la commande est fonction de cette force, donc

de l'accélération.
Ce principe permet d'obtenir des accéléromètres de meilleure précision La mesure de localisation de l'objet en mouvement est obtenue par double intégration, d'où une augmentation quadratique des erreurs de position. Les dérives dans le temps sont donc le principal inconvénient de ce type de traqueurs. L'accélération terrestre est à prendre en compte dans les mesures, par exemple avec un inclinomètre.



F - 3 Traqueurs électromagnétiques

TRAQUEURS

ÉLECTROMAGNÉTIQUES A CHAMP ALTERNATIF

Ce type de traqueur est composé d'un émetteur, d'un récepteur et d'une unité électronique. L'émetteur est un ensemble de trois bobines, qui propagent des champs électromagnétiques dans une sphère environnante de quelques mètres. Le récepteur est lui aussi composé de trois petites bobines qui recueillent des flux magnétiques fonction de la position de celles-ci par rapport à l'émetteur.

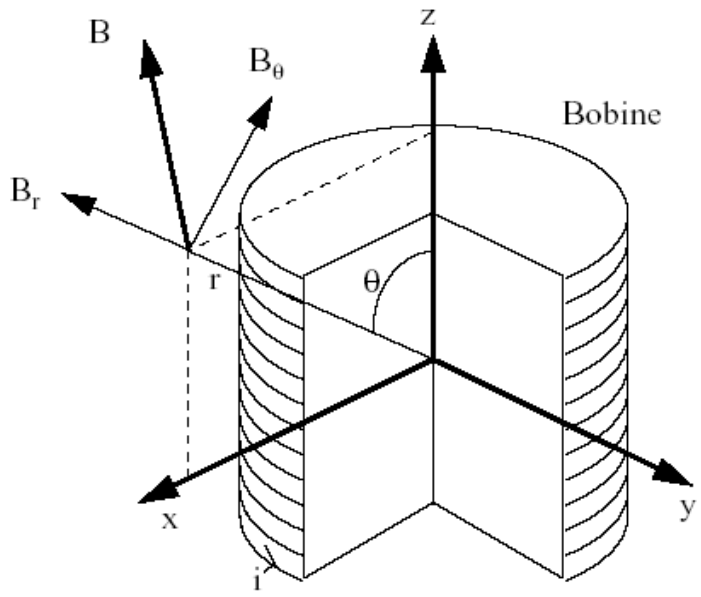
Pour un point éloigné d'une bobine, où passe un courant alternatif

$$I = Io\,exp(-iwt)$$

le champ magnétique B créé a pour valeur en coordonnées polaires r et θ dans un plan contenant l'axe de la bobine.

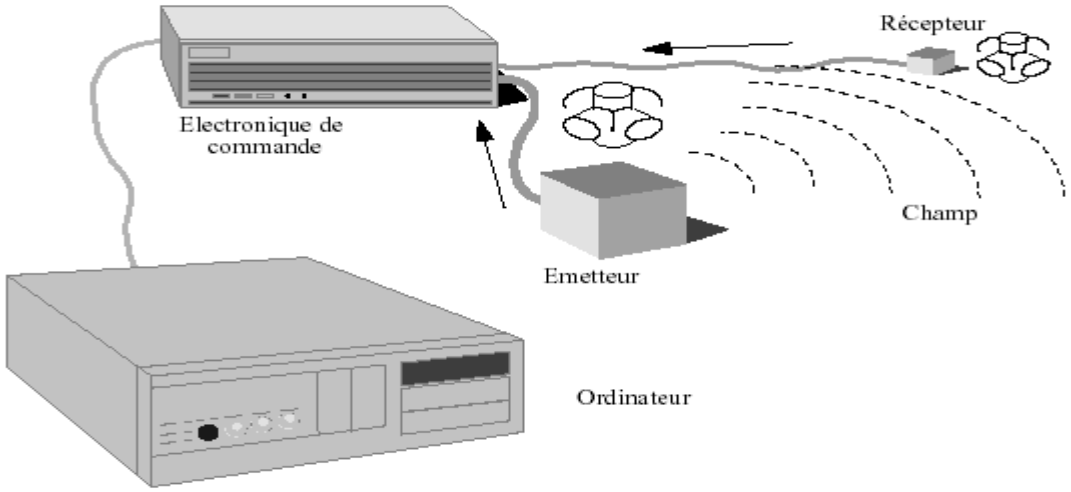
$$Br = \mu 0.NIR^2 \cos(\vartheta)/2r^3 \quad et \quad Br = \mu 0.NIR^2 \sin(\vartheta)/4r^3$$

avec µo perméabilité du vide, λ longueur d'onde, les conditions géométriques : r >> R et r >> L et une bobine de N spires, de rayon R et de longueur L.



Champ électromagnétique autour d'une bobine

Avec une bobine de l'émetteur, on crée un champ magnétique alternatif, dont l'intensité est fonction de r et de θ. La direction et l'intensité de ce champ sont déterminées avec les trois bobines du récepteur, orientées orthogonalement entre elles, car celles-ci recueillent des courants électriques mesurés, fonction de r et de θ. De même on crée deux champs magnétiques avec les deux autres bobines de l'émetteur, orientées aussi orthogonalement entre elles.



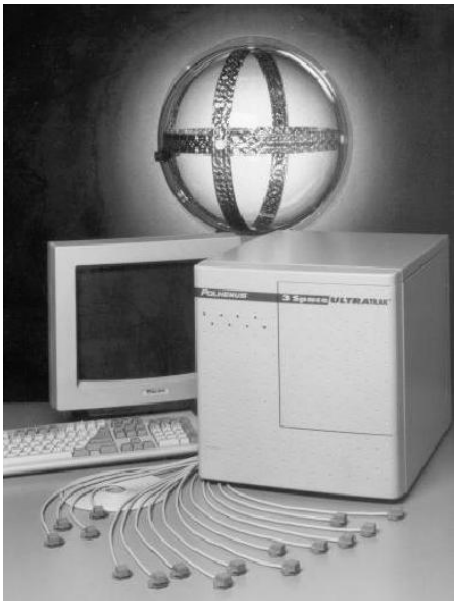
Dispositifs d'un capteur de localisation électromagnétique.

On peut penser que pour déterminer les 6ddl du récepteur, on crée isolément avec chaque bobine un champ magnétique, chacun à un instant différent. Dans ces conditions, on aurait un système d'équations non linéaires, difficile à linéariser. En pratique, pour contourner cette difficulté, l'émetteur crée un champ dans la direction supposée du récepteur et dans les deux directions orthogonales correspondantes, à deux autres instants. Dans ces conditions, le système d'équations est assez facilement linéarisable.
L'unité électronique, qui gère l'ensemble, a les fonctions suivantes :
- alimentation des trois bobines de l'émetteur par des courants alternatifs de fréquence porteuse voisine de 10 KHz;.
- mesure des courants circulant dans les bobines du récepteur ;
- calcul des paramètres de localisation en fonction des mesures effectuées ;

- filtrage éventuel des mesures pour supprimer les bruits parasites, mais celui-ci augmente le temps de réponse ;
- transmission des valeurs calculées à l'ordinateur en communication avec l'appareil.

L'unité électronique peut gérer plusieurs récepteurs (4 par exemple) et le constructeur a prévu des fréquences porteuses différentes pour associer dans un même espace jusqu'à 4 émetteurs commandés par 4 unités différentes (16 récepteurs).

Les mesures et les calculs doivent être effectués le plus rapidement possible pour obtenir une localisation en temps réel. Le traqueur est d'autant plus efficace qu'il peut réaliser un grand nombre de mesures précises par seconde (120) et qu'il transmet les valeurs obtenues le plus rapidement possible. Les ordres de grandeur du temps de latence en pratique 9 ms, avec un seul récepteur et sans filtrage, à 45 ms avec filtrage.



Un logiciel de communication et d'exploitation est fourni avec le dispositif, pour faciliter l'utilisation du matériel.

La contrainte principale de ce type de traqueur est qu'il ne peut pas fonctionner dans un espace comportant des pièces métalliques. En présence de pièces conductrices, le champ magnétique variant dans le temps crée des courants induits dans ces pièces (les courants de Foucault). Les intensités de ces derniers sont proportionnelles à la fréquence du champ magnétique et créent des champs magnétiques complémentaires qui perturbent les mesures.

Le traqueur *Ultratrak* (ci-contre) est la version permettant une utilisation sur une grande étendue de mesure, jusqu'à cinq mètres, et avec au maximum seize récepteurs en fonctionnement. L'émetteur est une sphère d'un diamètre de 18 pouces.

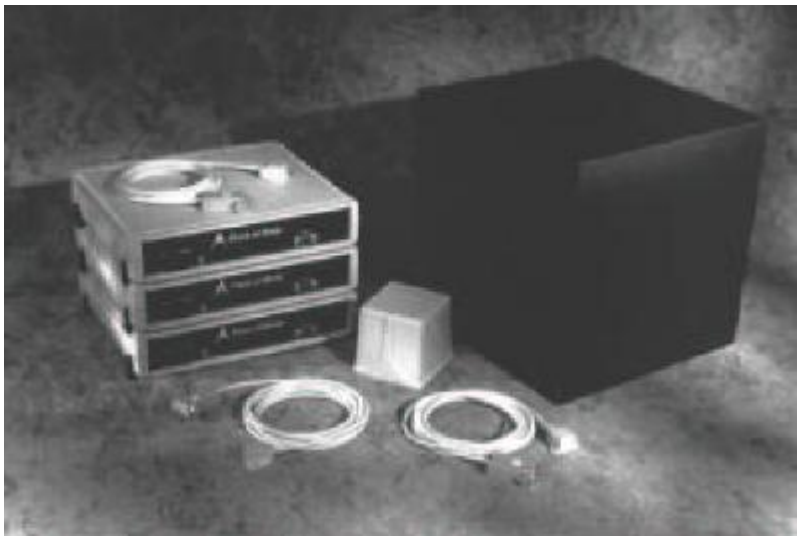
TRAQUEURS ELECTROMAGNETIQUES A CHAMP IMPULSIONNEL

Pour supprimer ou du moins atténuer les courants de Foucault, on peut réaliser les mesures avec des champs magnétiques constants non générateurs de tels courants.

Les formules précédentes du champ magnétique restent valables en prenant I = Io constant.

Le champ magnétique d'une bobine de l'émetteur est impulsionnel pendant 2,5 ms environ. Au début de cet intervalle de temps, il y a création de courants de Foucault qui diminuent ensuite quand le champ magnétique devient constant. A ce moment les mesures sont effectuées sur les trois bobines du récepteur. Ce cycle séquentiel est répété deux fois pour les deux autres bobines de l'émetteur. Un quatrième intervalle de 2,5ms est réservé à la mesure du champ électromagnétique du lieu qui dans ce type de traqueur est déterminé (il peut donc être variable). Le cycle total des mesures d'une position du récepteur dure moins de 10 ms. La structure matérielle est similaire à celle du traqueur précédent, sauf dans la forme du bobinage. L'émetteur comme le récepteur sont composés de trois bobines enroulées sur un cube. Le récepteur a en plus au centre du cube un bobinage cylindrique complémentaire pour augmenter l'énergie magnétique réceptionnée.

Le constructeur de ce type de traqueur propose l'emploi d'un émetteur avec plusieurs récepteurs (jusqu'à 30) sans diminution du nombre de mesures par seconde. Les ordres de grandeur du temps de latence : en pratique 8 ms, avec un seul récepteur et sans filtrage, à 47 ms avec filtrage. On peut aussi exploiter plusieurs émetteurs pour augmenter l'étendue de mesure.



Traqueur Bird d'Ascension, © photo Immersion S.A. ^ & >



Ce même constructeur propose, à tout concepteur de système de réalité virtuelle, des boucles magnétiques servant d'antennes à positionner soi-même (*SpacePad* ci-contre). Les antennes peuvent être disposées horizontalement et verticalement dans une pièce ou sur tout dispositif, permettant une localisation à la fréquence de 120 Hz avec un récepteur.

Ascension commercialise aussi un traqueur de petites dimensions (9 x 6 x 6 mm pour le récepteur) : le *miniBird.*
La société *Northern Digital Inc (NDI)* propose un nouveau capteur électromagnétique *Aurora,* ayant des récepteurs de 0,9 mm de diamètre, 10 pouvant être suivis simultanément.
Les précisions annoncées sont de 1 mm en translation et de 0,5° en rotation.
La fréquence de mesure est comprise entre 20 et 60 Hz, indépendant du nombre de récepteurs. Un logiciel détecte et informe des perturbations électromagnétiques.

CARACTERISTIQUES DES TRAQUEURS ELECTROMAGETIQUES

Les traqueurs électromagnétiques présentent de bonnes performances quant à la précision des mesures. Ils sont les plus employés pour les applications liées à la réalité virtuelle, car ils sont transparents pour l'utilisateur. Ils ont pour principaux inconvénients :
- leur coût élevé (trop pour des applications «grand public»)
- la liaison électrique par câble avec le récepteur peut être une entrave à la liberté de mouvement du solide observé. Des systèmes sans liaison par câble entre le récepteur et le boîtier électronique existent maintenant depuis 3 à 4 ans sur le marché.
- et surtout, l'impossibilité d'employer les appareils à champ magnétique alternatif dans un environnement métallique. Sauf si celui-ci est fixe : dans ce cas, il est possible de faire un étalonnage préalable pour compenser les perturbations. L'étalonnage est délicat à mettre en oeuvre et n'est réalisé que pour des cas très particuliers, comme l'intérieur d'un cockpit d'avion.
Les temps de latence sont relativement courts et comparables entre les deux types de traqueurs. Ces temps augmentent s'il y a plusieurs récepteurs en fonctionnement et surtout si un filtrage des mesures est effectué. N'oublions pas que le temps de réponse global dépend aussi du temps de transmission des données (par liaison série ou parallèle) entre le contrôleur et l'ordinateur.
Un gain de temps dans la transmission est réalisé si on incorpore l'électronique de mesure sur

une carte directement connectable dans l'ordinateur.
L'entreprise *Polhemus* le propose avec le traqueur *InsideTrak* et l'entreprise Ascension avec le traqueur *pcBird*, mais leurs caractéristiques sont de moins bonne qualité.
Pour conclure sur cette catégorie de traqueur : ils sont les plus employés jusqu'à ce jour en réalité virtuelle, même si depuis dix ans leurs performances ont peu progressé et leur prix peu diminué.

COMPAS

La terre crée un grand champ magnétique qui peut être utilisé pour des mesures de localisation. Les compas électroniques miniatures exploitent principalement l'effet Hall.
Ce phénomène consiste en une déviation de courant dans une plaque métallique très mince, quand on place celle-ci dans un champ magnétique normal à son plan. Avec deux capteurs à effet Hall perpendiculaires entre eux, on peut déterminer le nord magnétique terrestre. Combinés avec un inclinomètre, on obtient un traqueur d'orientation à 3 ddl.

Par exemple, l'entreprise Intersense a plusieurs traqueurs d'orientation à technologie inertielle.



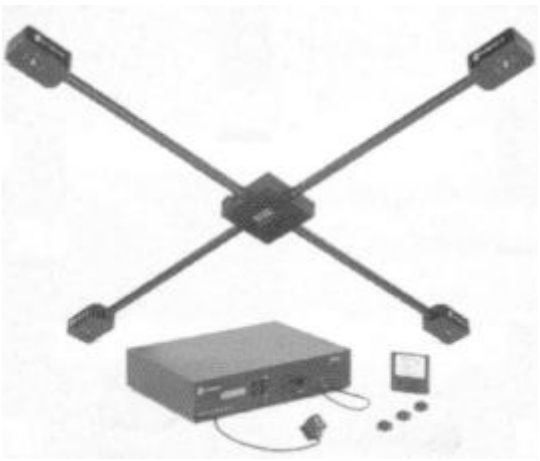
L'InterTrak2 à 3 ddl d'orientation à technologie inertielle d'InterSense, © photo SimTeam

Le dispositif inertiel mesure les vitesses angulaires de rotation avec un gyroscope, l'attraction terrestre avec un inclinomètre et le champ magnétique terrestre avec *des compa*s.
Mais ce type de traqueur a pour principal inconvénient d'être perturbé par les pièces métalliques environnantes et par les variations locales du nord magnétique. Dans le cas de l'emploi de mesures seulement relatives, ce problème est moins crucial.

Association de capteurs

L'entreprise *Intersense* a plusieurs traqueurs d'orientation à technique inertielle. Le capteur inertiel InterTrax2 de *Intersense* mesure 3 degrés de liberté (les 3 rotations sur 360°). C'est un traqueur bon marché, qui est fourni en standard avec des visiocasques bas de gamme, *Glasstron* de *Sony* et *Scuba* de *Philips*.
Avec un dispositif inertiel miniature, le IS 300 Pro mesure les vitesses angulaires de rotation avec un gyroscope, l'attraction terrestre avec un inclinomètre et le champ magnétique terrestre avec des compas.. Les vitesses de rotation dans les trois directions sont intégrées pour obtenir les trois rotations. L'inclinomètre et le compas sont utilisés pour compenser les dérives du gyroscope. Un algorithme de prédiction du mouvement est fourni avec ce capteur, ce qui peut être intéressant pour diminuer le temps de retard dans la boucle «action - perception» de tout système de réalité virtuelle. La portée des appareils est illimitée par principe (limitée en pratique

par la longueur des câbles) et il n'y a pas de problème d'occultation.
L'*IS-300 et l'IS-300 Pro* sont des capteurs d'orientation plus rapides et plus précis que l'*Intertrax*. La fréquence d'échantillonnage de l'IS-300 Pro monte jusqu'à 500Hz. Sa vitesse maximale de rotation permise est de 1200°/sec. Sa résolution est de 0,02°RMS et sa précision est de 3°RMS. *Intersense* commercialise aussi un traqueur à 6 ddl à technologie hybride inertielle et ultrasons, le *600 Mark 2*.

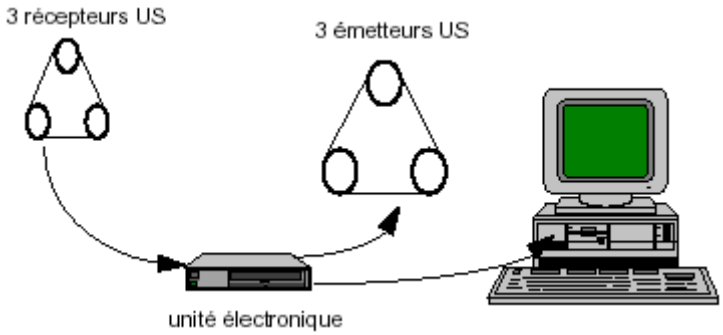


Le traqueur 600 Mark2 de Intersense, © photo SimTeam

F - 4 Traqueurs acoustiques

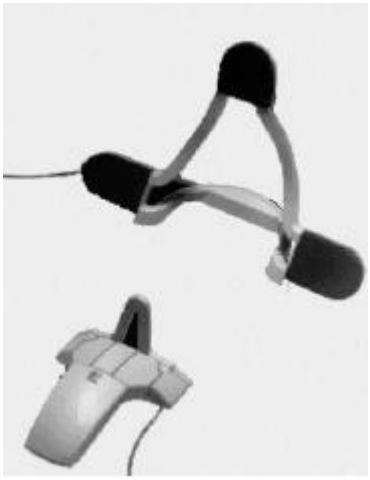
Ce type de traqueur a pour principe la mesure de distances déterminées par des temps de propagation d'ultrasons dans l'air. Les lois de l'acoustique indiquent que la vitesse du son C dans l'air sec, à la pression normale, est fonction de la température : $C = 331.(T/273)^{1/2}$ en m/s (et T, température ambiante, en degrés Kelvin)
La vitesse est aussi fonction de l'humidité de l'air.
La technique consiste à exciter une céramique piézoélectrique de manière impulsionnelle, à une fréquence voisine de 40 KHz. Cette fréquence résulte d'un compromis entre des fréquences plus élevées où l'atténuation de l'onde dans l'air limite la portée (2 m environ à 80 KHz) et des fréquences plus basses pour lesquelles la longueur d'onde λ (λ=C/f) est trop grande, d'où aussi la résolution qui est égale à λ.
Dans l'air à 40 KHz, la longueur d'onde est de 331/40000 = 8,3mm. (à 200 KHz, λ = 1,66 mm -à 20 KHz, λ = 16,6 mm).
Une autre contrainte concerne l'angle solide du faisceau sonore qui diminue quand la fréquence augmente. Une pastille de 20 mm de diamètre excitée à 40 KHz émet dans un cône de 30° environ. Pour une distance de 3,3 m, le temps de vol est de 10 ms, ce qui n'est pas négligeable si on veut un temps de réponse très court du capteur. Il faut ajouter au temps de vol le temps de l'émission impulsionnelle (environ 1 ms). Comme il faut au moins trois émetteurs, la mesure totale est trois fois plus grande si les mesures de distances sont faites cycliquement. On peut coder différemment les impulsions, soit en fréquence, soit en durée pour diminuer le temps de réponse du capteur, comme le proposent des chercheurs.
Le traqueur type est composé d'un ensemble triangulaire fixe de trois émetteurs d'ultrasons (céramiques piézoélectriques) et d'un ensemble triangulaire de trois récepteurs qui est lié à l'objet (céramiques identiques, la piézoélectricité étant un phénomène réversible).

Les mesures des différents temps de vol des ultrasons entre les émetteurs et les récepteurs permettent de déterminer la position de l'objet



Il faut noter que cela n'est possible que si les émetteurs soient orientés vers les récepteurs. La

zone d'étendue de mesure pour les orientations est donc plus limitée que pour les traqueurs électromagnétiques. En distance, la zone d'étendue est par exemple pour le *S20 Sonic Digitizers* de *science Accessories Corporation* de 16x8x8 pieds pour une précision 1,3mm



Un système électronique gère les émissions d'ultrasons, les mesures de temps de propagation les calculs des paramètres et la communication avec l'ordinateur exploitant les mesures. Le traqueur type peut réaliser 50 mesures par secondes. Son faible coût est un avantage par rapport au traqueur électromagnétique

Traqueur acoustique de Logitec, © photo Immersion S.A.

La liaison électrique par câble avec le récepteur peut être une entrave à la liberté de mouvement du solide observé, comme pour les traqueurs électromagnétiques, sauf dans le cas original suivant : Normalement, la sonde émettrice et la sonde réceptrice doivent être reliées toutes les deux au boîtier électronique de commande pour la synchronisation des impulsions et des mesures des temps. En associant les ultrasons et les infrarouges, ces derniers servant à synchroniser les émissions ultrasonores, on peut s'affranchir du câble entre le boîtier de commande et la sonde portée par la personne observée. Il fonctionne de la façon suivante :
- on dispose d'une part d'un petit boîtier portable, de la taille d'une boite d'allumette, qui comprend un émetteur d'ultrasons et un récepteur d'infrarouges. Dans la pièce on place aux moins trois boîtiers fixes comprenant chacun récepteur d'ultrasons et un émetteur d'infrarouges ;
- le micro-ordinateur PC demande une mesure ;
- chaque récepteur d'ultrasons des boîtiers fixes envoie une impulsion infrarouge, se place en attente de réception d'une impulsion ultrasonore en chronométrant le temps d'attente ;
- si le boîtier portable reçoit au moins une des impulsions infrarouges, il émet une impulsion ultrasonore ;
- chaque récepteur d'ultrasons enregistre le temps d'arrivée de l'impulsion ultrasonore;
- l'ordinateur calcule par triangulation la position du boîtier portable, sachant que les temps de propagations des ondes infrarouges sont négligeables devant ceux des ondes ultrasonores.

Ce système présente plusieurs avantages :
- il n'y a pas de liaison matérielle entre le boîtier portable et l'environnement;
- l'étendue de mesure peut être grande en augmentant le nombre de récepteurs d'ultra-sons;
- le prix est faible, comparativement aux autres capteurs ;
- l'encombrement et le poids sont faibles ;
- la précision est de l'ordre du millimètre dans une aire de plusieurs mètres.

Il présente les inconvénients suivants :
- le récepteur IR (le boîtier portable) doit voir au moins un émetteur IR ;
- la température influence les mesures car la vitesse du son est fonction de la température.
- Le dispositif doit être étalonné.

Mais ce traqueur est resté à l'état de prototype non commercialisé par Contrôle US.
Un autre constructeur propose un traqueur, reposant sur le même principe, que l'on fixe à un doigt. Cette interface, a priori employée en pointeur 3D, exploite les ultrasons et les infrarouges. Ces derniers servent à indiquer au boîtier électronique l'instant du début de l'émission ultrasonore. Il n'y a donc pas de fil entre la main et le dispositif de mesure. Le capteur est composé d'un émetteur et de trois récepteurs d'ultrasons, qui sont fixés sur le bord de l'écran. La fréquence de mesure est de 50 Hz, la résolution est de 0,3 mm et l'étendue de mesure est limitée à 90 cm.

Il existe aussi des traqueurs acoustiques dont le principe est basé sur la mesure de déphasage entre l'émission sonore et la réception sonore. Dans ce cas les mesures sont continues, ce qui permet un meilleur temps de latence et aussi de pouvoir filtrer les données pour diminuer les bruits.
Rappelons aussi que l'entreprise *Intersense* commercialise un traqueur à 6ddl à technologie hybride inertielle et ultrasons (le *600 Mark 2*).
Les 4 récepteurs à ultrasons sont aux extrémités d'une croix et complètent les mesures données par la centrale inertielle (trois rotations).
Les traqueurs à ultrasons ont pour principal défaut d'être influençables par la température ambiante, la vitesse du son dépendant de la température. Il pourrait être prévu un étalonnage automatique par la mesure de la vitesse du son entre deux points fixes, comme cela existe sur certains traqueurs à ultrasons (mesure de niveau). Ces capteurs sont facilement bruités par tous les appareils qui émettent des ultrasons et par les échos sur les parois. Une entreprise a conçu des algorithmes de filtrage pour diminuer l'influence des bruits et des échos. Comme indiqué précédemment, l'émission d'ultrasons est très directive, ce qui limite l'espace de mesure. En contrepartie, les traqueurs à ultrasons ont pour avantage leur faible coût comparativement aux traqueurs électromagnétiques, et, évidemment, de fonctionner dans un environnement métallique.
Le couplage des techniques ultrasons et infrarouges peut être une solution d'avenir qui demande à être encore développée techniquement et commercialement.

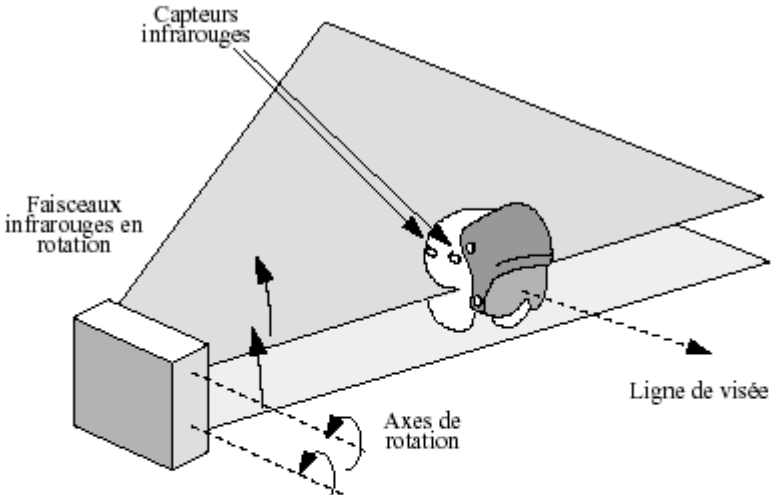
F - 5 Traqueurs optiques

Il n'y a pas dans cette catégorie de traqueur standard. La lumière est en général émise par l'intermédiaire de diodes électroluminescentes (LED) dans les infrarouges pour que la lumière ambiante ne perturbe pas les mesures. On peut aussi observer des cibles ponctuelles dans le spectre visible, la lumière ambiante étant mise à profit. Les traqueurs sont classés en deux groupes :
- les capteurs qui mesurent des angles à partir de rayons lumineux reçus sur des senseurs ponctuels infrarouges (phototransistors) ;
- les capteurs qui utilisent des récepteurs plans (caméras).

TRAQUEURS AVEC RŠCEPTEURS PONCTUELS

Des traqueurs ont été conçus pour détecter le mouvement de la tête d'un pilote d'avion, avec le principe suivant : sur le côté du cockpit, deux fins faisceaux lumineux plans tournent autour de deux axes de rotation parallèles. Leurs passages sur le casque sont détectés par des senseurs infrarouges, ce qui permet de connaître la rotation angulaire des faisceaux quand ceux-ci pointent sur les senseurs. Ces deux mesures d'angles permettent de déterminer chaque droite, parallèle aux axes de rotation, sur laquelle se trouve chaque senseur. Avec deux senseurs, on peut connaître deux angles d'orientation du casque. Pour augmenter la qualité de détection des mouvements, on peut augmenter le nombre de senseurs ou mettre un système identique de l'autre

côté du casque
Un autre type de traqueur basé sur un ensemble de LED et de récepteurs ponctuels a pour principe la variation d'intensités reçues sur deux LED en fonction de leur position relative angulaire. Ce traqueur est encore sous la forme d'un prototype et pourrait être employé dans le domaine des jeux virtuels.
Il a été conçu par David Fenner.
Le principe de base est le suivant :
Un transmetteur est composé de deux LED infrarouges et le récepteur a deux photodétecteurs adjacents (figure 1).
Si la LED 1 envoie une impulsion, le rapport des intensités reçues sur les photodétecteurs est fonction de l'angle entre la LED 1 et les récepteurs 3 et 4 (figure 2). En plaçant un autre photodétecteur 5, la distance entre le transmetteur et le récepteur peut être calculée (figure 3).
Par addition d'un autre récepteur, on peut déterminer la position spatiale de la LED 1 (figure 4).
Les LED envoient des impulsions qui peuvent transmettre un codage correspondant à l'identification de la LED. Dans ce cas, les photodétecteurs peuvent être utilisés pour plusieurs LED. Cinq LED suffisent pour la détermination des 6 ddl du transmetteur. Le traqueur devrait être de faible coût. Le transmetteur a un faible poids et est alimenté par une petite batterie.



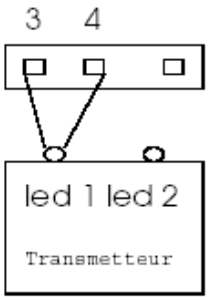


Fig 1

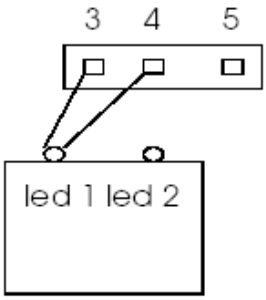
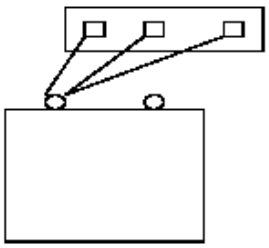
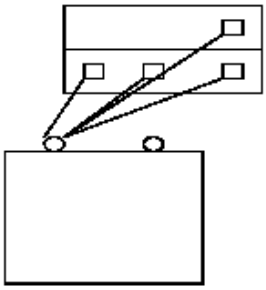


Fig 2


Fig 3


Fig 4

TRAQUEURS AVEC RECEPTEURS PLANS

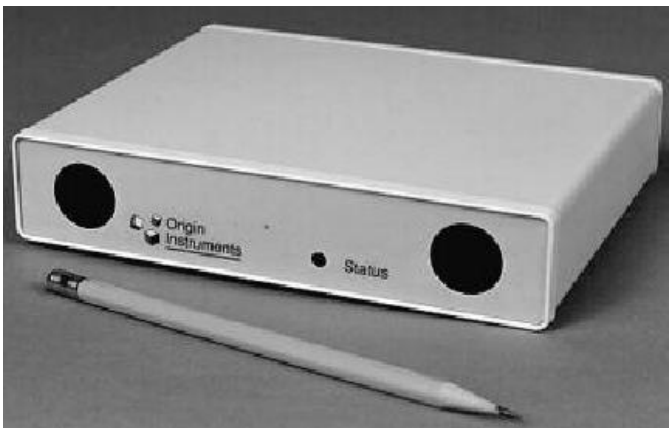
A partir du traitement d'images acquises par des caméras, il est toujours possible de déterminer la position d'un objet à l'aide de deux ou trois caméras. Les solutions obtenues ne sont exploitables en général qu'au cas par cas. Ce vaste domaine scientifique de la reconstruction tridimensionnelle d'un environnement par stéréovision ou par plus de deux caméras n'est pas abordé dans cette étude. Il est aussi exploité pour le suivi du mouvement de la tête de l'observateur (face à un écran souvent). Mais dans ce cas, cela concerne plus la téléconférence, Internet et aussi la télévirtualité, en faisant vivre à distance un avatar (clone) de l'utilisateur. (ce qui est une technologie d'avenir pour les jeux dans le Cyberspace).
Ne seront présentés que des dispositifs susceptibles d'être exploités en interface comportementale. Certaines ne sont pas commercialisées ou anciennement, mais leur description

peut aider l'ingénieur a en concevoir pour son application spécifique.
On peut considérer deux principes de mesure suivant le type d'acquisition des images :

- soit une ou plusieurs caméras sont fixes et observent des mouvements de repères ponctuels (LED ou marquage). C'est le principe de l'extérieur vers l'intérieur (outside-in);
- soit une ou plusieurs caméras sont en mouvement sur l'objet à localiser et elles observent des repères ponctuels fixes. C'est le principe de l'intérieur vers l'extérieur (inside-out).

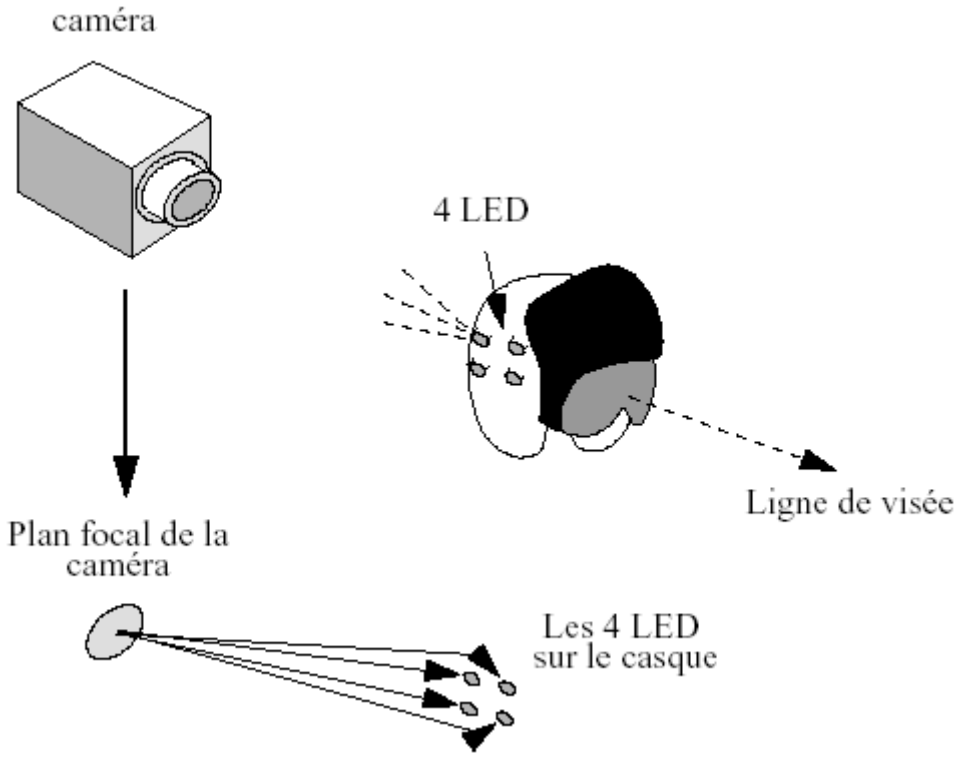
Principe de l'extérieur vers l'intérieur (outside-in) :

Il existe des capteurs spécifiques de localisation angulaire exploitant les mêmes dispositifs techniques que les caméras de traitement d'images. A l'aide d'un détecteur et d'un système optique associé, on détermine la position angulaire d'une balise ponctuelle émettrice en infrarouge par rapport à l'axe optique du dispositif.
Plusieurs balises peuvent être repérées en ayant des codages lumineux différents. Les balises sont indépendantes des capteurs. Ce capteur est surtout exploité pour la détermination de trajectoires.
Ce principe a été utilisé pour suivre le mouvement d'une paire de lunettes (et donc de la tête), quand l'observateur regarde des images stéréoscopiques sur un écran. Pour augmenter la perception de la profondeur, comme nous l'avons indiqué au chapitre sur les sens humains (vision), nous pouvons changer en temps réel le point de vue des images stéréoscopiques en fonction du mouvement de la tête devant l'écran.
C'est l'objectif du traqueur optique DynaSight de Origin Instruments Corporation. Le traqueur est un capteur compact qui mesure à 65 Hz la position tridimensionnelle (3ddl) d'une cible passive très légère (10 mg) qui se met sur la paire de lunettes stéréoscopiques



Le traqueur optique DynaSight pour le suivi de mouvement de paires de lunettes,
© photo Origin Instruments Corporation

Il fonctionne près des infrarouges sur une étendue de mesure de 75° en élévation par 75° en azimut et en profondeur de 1,5 m (cible de 7 mm) à 5 m (cible de 50 mm). Le temps de latence est satisfaisant (9 à 28 ms). La précision est de 2 mm latéralement et de 8 mm en profondeur. Un dispositif adaptatif avec 4 cibles permet d'obtenir un traqueur à 6 ddl.
Avec un dispositif similaire, pour détecter le mouvement d'un visiocasque avec le principe outside-in, on place quatre LED sur le casque (théoriquement trois suffisent, mais la redondance de mesure augmente la précision)



Principe de l'extérieur vers l'intérieur pour un capteur de localisation optique

Connaissant les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques de la caméra, on peut déterminer la position du casque à partir des huit coordonnées sur le plan image
Au lieu de LED, on peut placer sur le visiocasque quatre marques. On n'est plus obligé d'alimenter les LED, mais le traitement des images est plus délicat. Plusieurs caméras sont nécessaires si on veut augmenter l'étendue de mesure.
A noter que certains dispositifs, conçus pour le «motion capture», peuvent être utilisés pour détecter seulement une partie du corps, comme deux doigts avec le système *Coda* de *Charnwood Dynamics*. Le dispositif, composé de trois caméras, suit en temps réel. la position tridimensionnelle de cibles : des petites LED infrarouges, chacune étant identifiable, qui sont alimentées par des petites batteries portables (autonomie d'une journée de travail). Le temps de latence est de 5ms et la fréquence de mesure monte jusqu'à 800 Hz. 56 LED sont identifiables et la résolution est de 0,1 mm (précision inconnue).

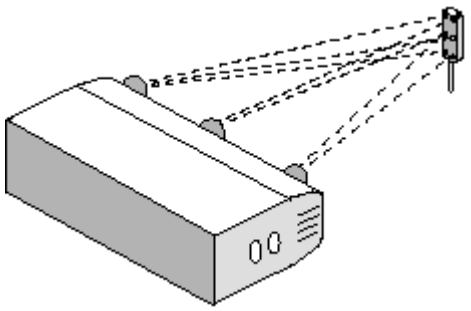


© photos Charnwood Dynamics

Le dispositif de 3 caméras et deux cibles sur deux doigts du système Coda motion capture pour le suivi de doigt

La difficulté du principe outside-in réside dans le fait que les repères ponctuels se déplacent peu relativement à la rotation de la cible, d'où une précision relativement faible en rotation. Dans le cas de mouvements de translation, la caméra doit avoir un grand champ de vision relativement à ces mouvements. Des capteurs de mesures tridimen-sionnelles exploitent le même principe dans le domaine de la métrologie. Avec trois ca-méras linéaires (2048 éléments) montées sur une poutre d'un mètre environ, le système Optotrak de Northern Digital Inc (NDI, ci-contre) peut donner la position de diodes émettrices infrarouges (jusqu'à 250). Les caméras linéaires, équipées de lentilles cylindriques, ont des résolutions «subpixel» meilleures que les caméras à

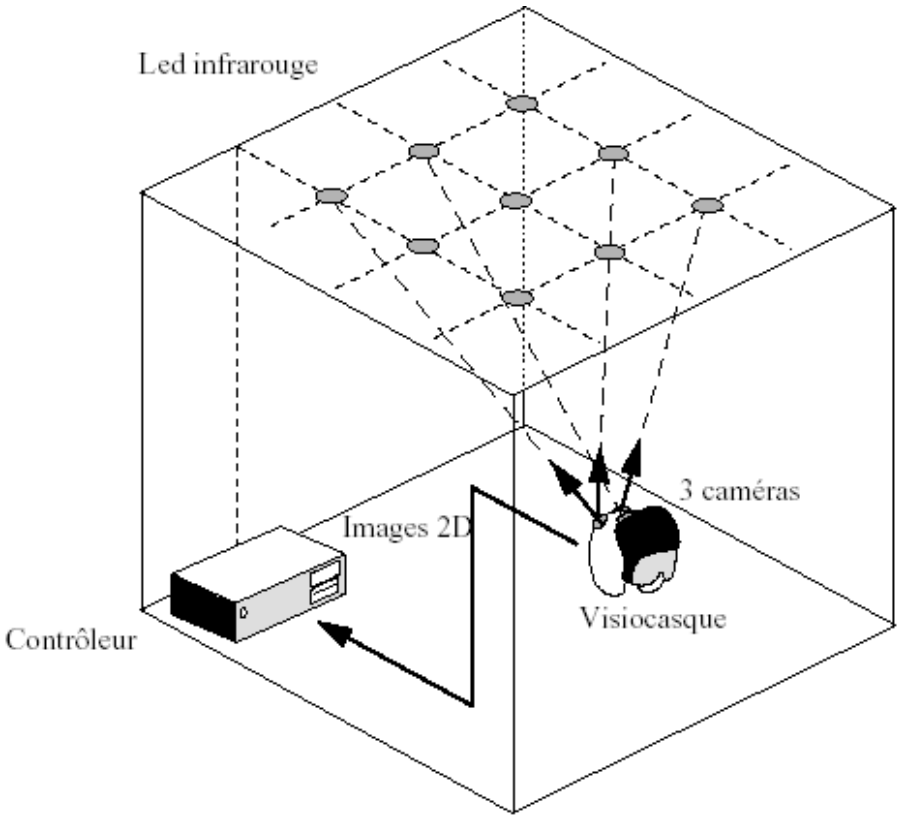
CCD plan (1/200000 au lieu de 1/4000). Des pointeurs «crayons» sont recouverts de 24 diodes, permettant de supprimer les problèmes d'occultation, quand on manipule les pointeurs.
Les caractéristiques sont très performantes : précision de 0,1 mm pour une zone à 2,25 m et d'étendue de 1,3 m sur 1,3 m, fréquence de transfert des données jusqu'à 400 Hz.



Ces systèmes de localisation précise sont relativement chers et servent au départ dans le domaine de la métrologie. Mais NDI a développé son système aussi pour la capture de mouvements du corps pour la conception des jeux vidéo, de la réalité virtuelle, etc.

Principe de l'intérieur vers l'extérieur (inside-out)

Avec le principe inside-out, en plaçant suffisamment de diodes fixes dans l'environnement, les mouvements relatifs des diodes par rapport aux caméras sont grands et les champs de vision de celles-ci peuvent être limités. Par contre, ce principe a pour inconvénient d'obliger la personne, dont on veut localiser la tête, à supporter le poids des caméras. Avec la miniaturisation des caméras «crayons» (moins de 100g), cet inconvénient peut disparaître.



Il reste que le traitement des images exige une grande puissance de calculs et que la salle où évolue l'utilisateur doit être spécialement aménagée. Avec trois caméras sur un visiocasque et une série de diodes fixées sur le plafond d'une pièce, des chercheurs ont obtenu il y a plusieurs années un traqueur ayant de bonnes performances, fonction de la station de travail employée :
- précision : au mieux 1 cm et 0,3°;
- étendue de mesure : pièce de 4x4 m²

Mais ce type de traqueur est bien complexe à mettre en oeuvre, ce qui est son principal défaut.
Les traqueurs optiques ont le même inconvénient que les traqueurs à ultrasons concernant l'espace limité de mesure, tout récepteur optique devant «voir» un émetteur. On peut toutefois augmenter l'étendue de mesure en rajoutant des récepteurs ou des émetteurs, mais cela au détriment du coût.

F - 6 Comparaisons

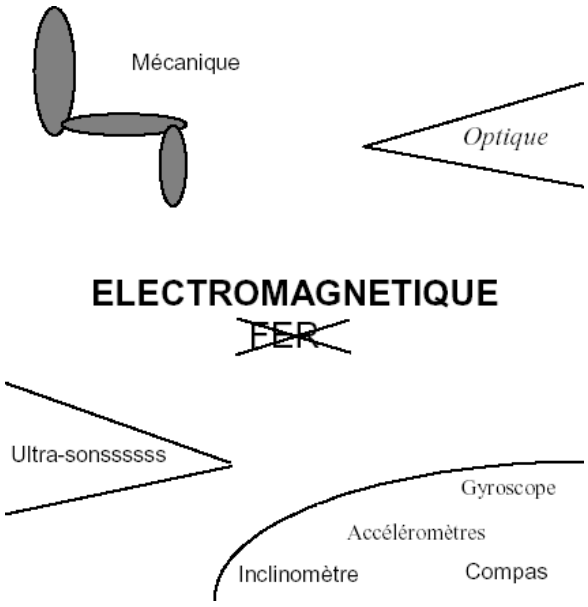
Les traqueurs mécaniques, mesurant des distances, sont intrinsèquement les meilleurs quant aux caractéristiques métrologiques, mais ils sont peu employés par manque de qualité ergonomique. Les traqueurs mécaniques, sans source émettrice artificielle, commencent à apparaître pour des applications en réalité virtuelle. Ils sont souvent vendus avec des visiocasques bas de gamme. Les traqueurs électromagnétiques sont performants. Ils sont souvent employés dans les applications liées à la réalité virtuelle, sauf pour les produits «grand public» à cause de leur prix élevé. L'impossibilité d'exploiter ces appareils dans un environnement métallique reste leur principal défaut. Les traqueurs à ultrasons ont pour principal défaut d'avoir une précision faible, d'être influençables par la température et l'humidité ambiantes et d'être perturbés par les bruits ultrasonores parasites. Ils ont pour avantages leur faible coût comparativement aux traqueurs électromagnétiques, et évidemment leur possibilité de fonctionner dans un environnement métallique. Le couplage ultrasons et infrarouges peut être une solution d'avenir bon marché qui demande à être encore développée techniquement et commercialement.
Les traqueurs optiques ont le même inconvénient que les traqueurs à ultrasons concernant l'espace limité de mesure. Il existe peu de traqueurs optiques standards pour la réalité virtuelle, ils sont réservés en général à des applications spécifiques.

Pour tous les traqueurs, il faut principalement comparer les caractéristiques métrologiques suivantes :

- le temps de réponse global (jusqu'au lieu d'exploitation des données) ;
- les précisions obtenues ;
- la fréquence de transmission des mesures à l'ordinateur (à ne pas confondre avec la fréquence d'échantillonnage, qui peut être plus élevée) ;
- l'étendue de mesure.

Ces quatre paramètres sont les principaux critères quantitatifs de choix d'un traqueur.

Après, on doit faire intervenir des considérations ergonomiques, en pensant aux contraintes d'utilisation du traqueur qui doivent être compatibles avec les I² sensori-motrices et mentales.
Comme nous l'avons déjà signalé, le traqueur universel parfait n'existe pas, mais le choix entre les différents types devient maintenant satisfaisant. Les problèmes techniques à résoudre ne sont pas aussi complexes que pour les autres interfaces, comme les visiocasques et les interfaces à retour d'effort. Le besoin d'interfaces à bon marché pour des produits «grand public» aurait dû permettre l'essor et la commercialisation de nouveaux traqueurs ou l'amélioration de ceux déjà existants, mais l'évolution est relativement lente.



Résumé symbolique des différences entre les différents traqueurs

G - Autres systèmes

Il me reste maintenant quelques technologies / systèmes n'étant pas aisément classable dans le reste du rapport à présenter.

Je ne reviendrai pas davantage sur les interfaces sonores et olfactives (interfaces sortantes) dont j'ai déjà parlé dans le chapitre «réalité virtuel du B.

Il n'est du tout impossible que j'ai oublié de parlé de systèmes qui puissent servir à la réalisation ou à l'interaction avec des jeux vidéos.
Si tel était le cas, ce serait toutefois des technologies peu employées.

En tous cas, je compte maintenant traiter des systèmes employés communément pas les créateurs de jeu et en particulier par les responsables graphismes.

Il s'agit de 3 systèmes de digitalisation / numérisation :
- le scanner pour les supports papiers ou de faible épaisseur
- l'appareil photo numérique pour toute scène réelle (acquisition unique)
- Les caméras numériques pour toute scène réelle (acquisition en continu)

Les capteurs utilisés par ses systèmes de numérisation sont des photo-détecteurs (cellules photoélectriques) qui transforment l'énergie lumineuse reçue en énergie électrique. La lecture de ces signaux donne naissance à un signal vidéo (analogique) qui sera ensuite converti pour générer dans l'ordinateur des informations numériques binaires.

La technologie PMT (Photo-Multiplicateur-Tube) est utilisée pour les scanners à tambour, c'est à dire les scanners les plus chers.
D'une grande précision, ces scanners permettent l'enregistrement d'un large éventail de densités, mais leur complexité rend leur fabrication et leur entretien plus coûteux que les capteurs CCD qui équipent la plupart des appareils actuels

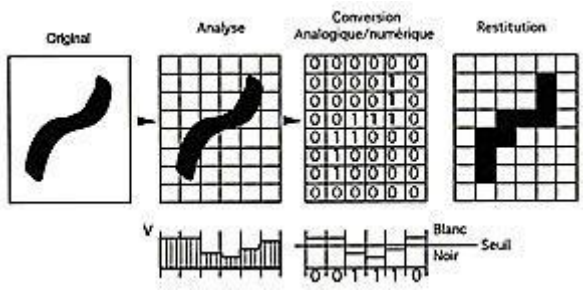
La particularité des CCD (charged couple device - dispositif à transfert des charges) réside dans leur miniaturisation. Ce sont des semi-conducteurs métal-oxydés organisés en barrettes de photodiodes .

Ils peuvent se présenter sous plusieurs formes :

* Des barrettes monochrome ou avec un revêtement RVB : qui vont se déplacer sur la surface à numériser, (scanner à plat, dos numérique).
* Des matrices monochromes (un passage pour chaque couleur RVB) ou des matrices à mosaïque de filtres RVBV, chaque élément ne capturant qu'une information colorée sur les trois. Dans le cas d'une matrice, c'est une surface rectangulaire, composée de micro-photodétecteurs, qui remplace la surface du film, la matrice est fixe.

Mais parlons un peu du …

PIXEL
Une image numérisée, encore appelée image BITMAP, se compose donc d'une matrice de pixels (abréviation de l'anglais «Picture element»), c'est-à-dire de petits carrés noirs ou blancs ou de différents tons de gris ou de couleur juxtaposés.



La taille du pixel est comprise entre 6 et 10 microns, malgré la miniaturisation des capteurs, le pixel reste 100 fois plus gros qu'un grain d'argent.

- 1 détecteur = 1 pixel
- 1 pixel = 10 x 10 µm ou 100 µm carrés
- 1 sel d'argent = 1 µm carré

Le rôle de la matrice est de recevoir les charges électriques. Parce qu'il n'est pas possible de connecter individuellement chaque pixel, la lecture se fait en déplaçant les charges des différents pixels.

A partir de là, l'échantillonnage détermine la qualité du signal, il se mesure en nombre de bits. De la régularité du pas d'échantillonnage dépend la finesse du codage en numérique.

On peut définir le nombre de bits par pixels ainsi :

Echantillonnage	Niveaux	Type d'image
1 bit/pixel	noir et blanc	film au trait
8 bits/pixel	256 niveaux de gris	image en demi-teinte
8 bits/couleur/primaire	256x256x256 couleurs	image en RVB
12 bits/couleur/primaire	4096x4096x4096 couleurs	image en RVB + Alpha
16 bits/couleur/primaire	65536x65536x65536couleurs	RVB en haute déf.

A présent, puisque le CCD est la source de tous les systèmes à suivre, nous allons le développer. Dans cette partie nous allons donc aborder le sujet des capteurs lumineux et plus particulièrement ceux qui servent à obtenir une image qui puisse être utilisable par un ordinateur. Nous allons pour cela passer en revue les différents types de capteurs: CCD et CMOS.

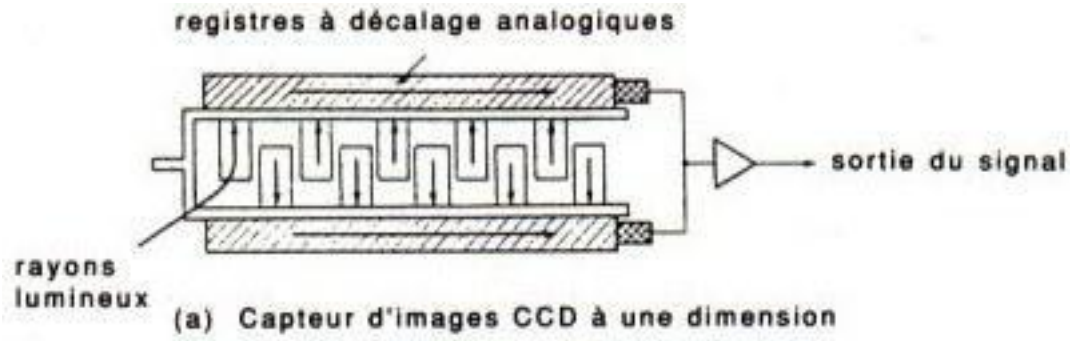
Capteurs CCD

Nous allons dans une première partie passer en revue les capteurs CCD, qui sont les capteurs les plus répandus dans le domaine.
Le schéma qui suit permet de voir le fonctionnement d'un capteur CCD. Ce capteur CCD est composé d'une plaque de silicium, recouverte d'électrodes et d'oxyde de silicium. Par le biais d'un jeu sur la polarisation des électrodes, nous allons créer à la surface de la couche de silicium des puits de potentiels au niveau de chaque pixel (cela formera la matrice). Chacun de ces puits de potentiels permettra de collecter "l'information lumineuse", dans le sens ou l'intéraction du silicium et des rayons lumineux entraîne une variation du potentiel au niveau des puits. Chacune de ces variations est proportionnelle à l'exposition du silicium au rayonnement et permet de coder l'information lumineuse. Il ne reste ensuite qu'à récolter cette information pour pouvoir la

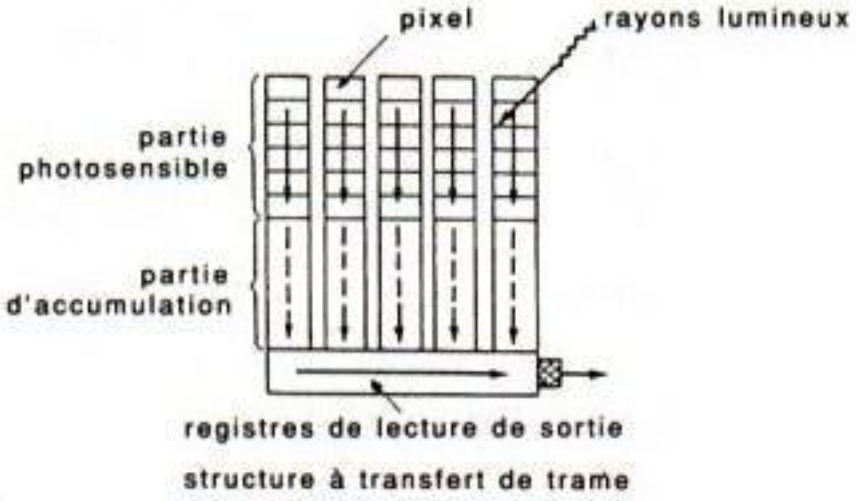
traiter. Pour ceci nous allons faire varier les potentiels des électrodes de telles façons que les charges électriques obtenues par le signal puisse être récoltée sur le bord du capteur CCD.

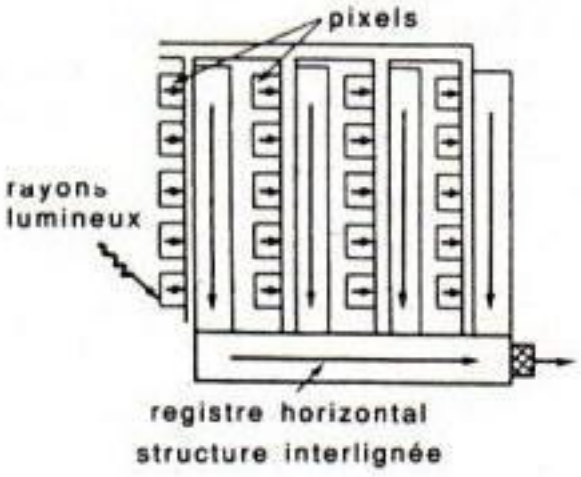
Schéma de récupération de l ’information des capteurs
On peut voir ci-contre voir comment l'information lumineuse est transformée en information électrique qui pourra par la suite être traiteé.

Sur le schéma suivant on peut voir les différentes méthodes qui permettent de récupérer cette information.



(a) Capteur d'images CCD à une dimension





(b) capteur d'images CCD à deux dimensions

Constitution d'un capteur d'images CCD

Nous allons maintenant aborder les capteurs CMOS qui forment la deuxième grande famille de capteurs.

Capteur CMOS (Complementary metal oxyde semiconductor)

Les capteurs CMOS, contrairement aux capteurs CCD où l'information lumineuse est transformée en information électrique au niveau de la plaque de silicium puis est rapatriée au bord de la plaque pour être amplifiée, dans un capteur CMOS, chaque pixel de la matrice est autonome. Dans un capteur CCD, si nous souhaitons connaître l'état d'un pixel, il faut que nous passions en revue l'ensemble des pixels pour obtenir notre information. Dans le cas d'un capteur CMOS, chaque pixel de la matrice possède sa propre zone sensible et son propre amplificateur. Ainsi pour l'obtention de notre information, il suffit de se focaliser sur ce pixel sans se soucier des autres pixels.

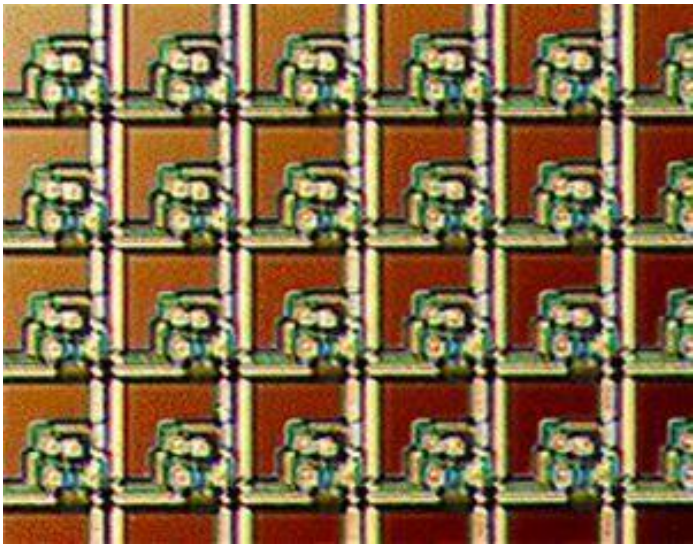


Diagramme Schéma réel

Schéma de récupération de l'information des capteurs dans un capteur CMOS.

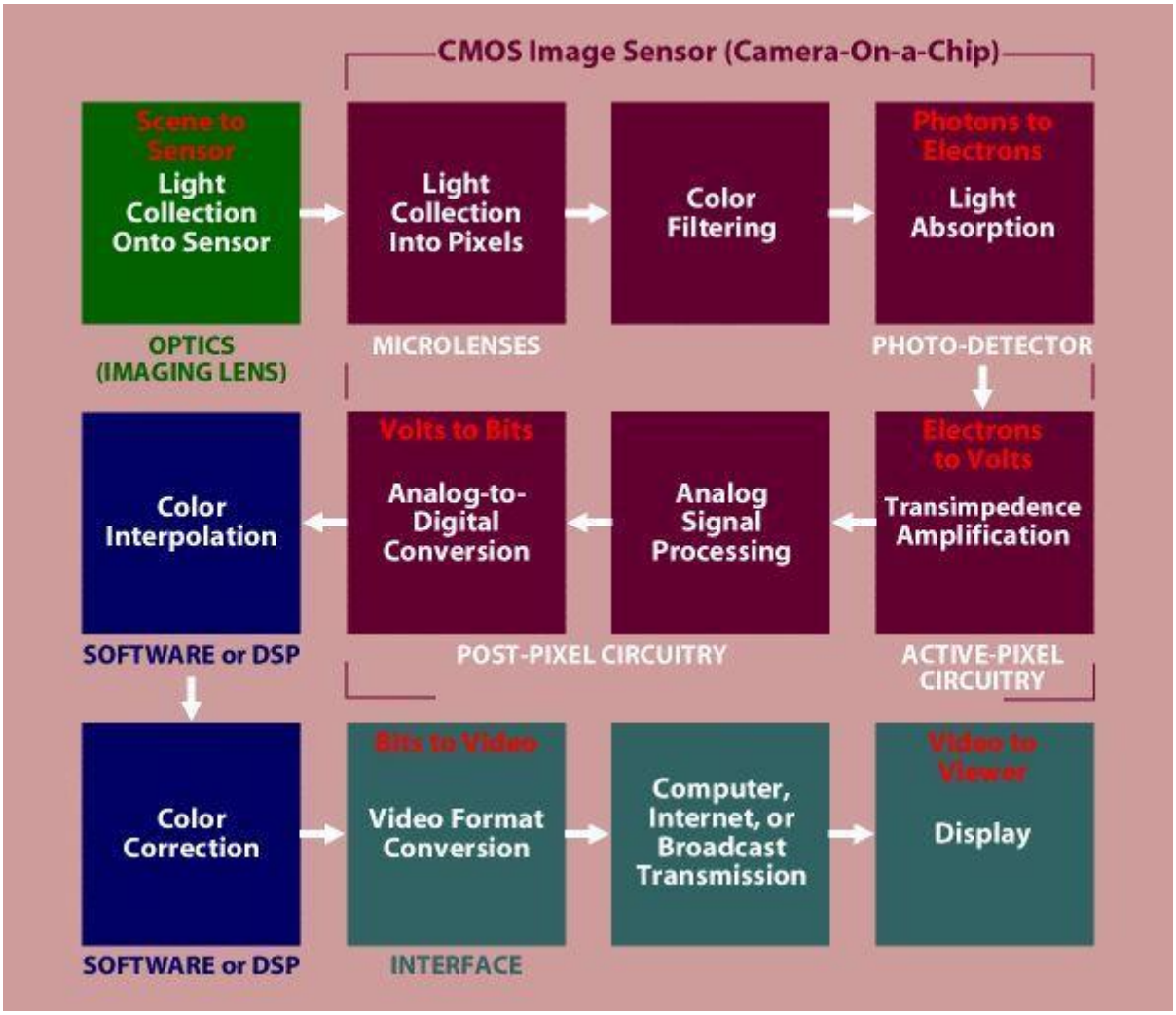


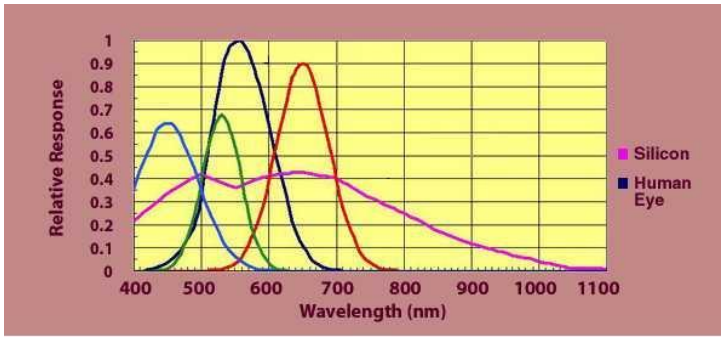
Schéma général d'un capteur CMOS

Le signal sortant de chaque pixel est systématiquement ré amplifié.

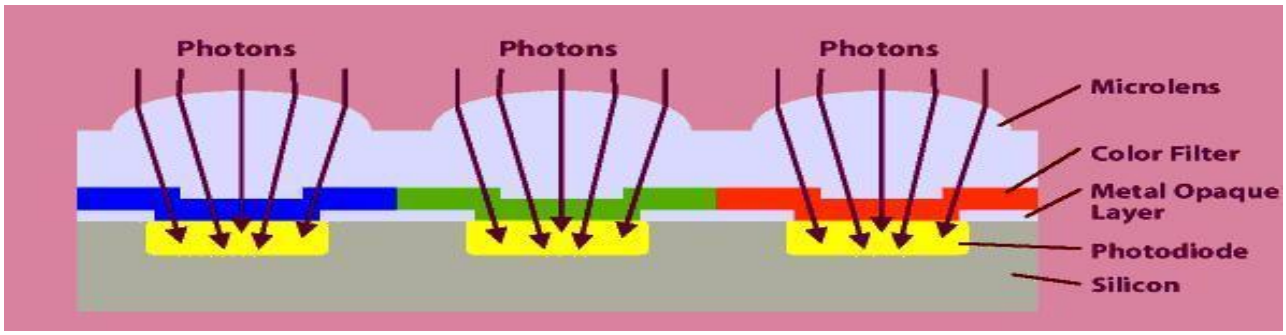
Choix du Silicium:

Nous allons maintenant nous intéresser au choix du support du capteur CCD.

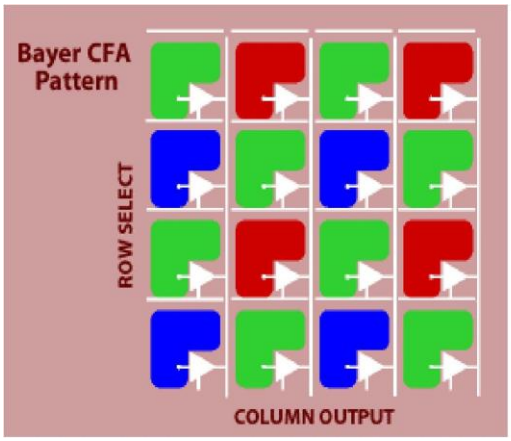
Il faut dans le cadre de la création graphique de jeux vidéo, que le support puisse répondre aux mêmes fréquences que les yeux humains (spectre visible) . Dans le graphique suivant, on peut observer que seul le silicium est sensible à l'ensemble de la plage de fréquences perceptibles par les yeux humains (400-800nm pour être large).

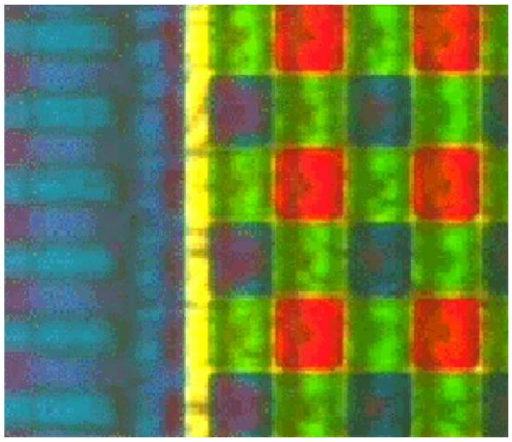


Comme nous avons pu le voir précédemment, la matrice du capteur CCD n'est sensible qu'à l'intensité lumineuse. Mais dans notre cas nous souhaitons obtenir un signal qui intègre la couleur. Pour ce fait nous plaçons devant chaque pixel de la matrice un filtre de couleur qui fait que ce pixel ne sera sensible qu'à une longueur d'onde.



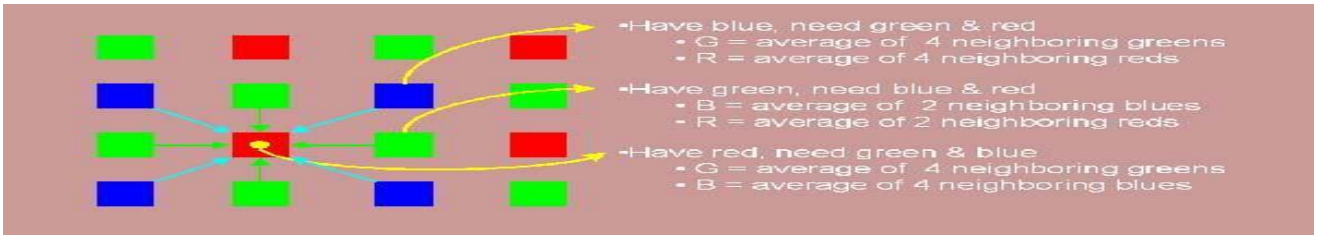
Par ce procédé nous obtenons seulement une information sur une couleur en un point particulier. Il va donc falloir par le biais d'un logiciel pouvoir traiter l'information des différents pixels de couleurs pour en obtenir une image en couleur. Pour ceci nous utilisons l’arrangement de BAYER.





Chaque pixel de la matrice présente donc un filtre de couleur. L'information ainsi obtenue, ne fournit pas une image en couleur mais des informations locales sur chacune des couleurs, il reste

ensuite à appliquer un algorithme développé par BAYER qui permet d'obtenir une image plus petite mais en couleur.



Nous obtenons par cette méthode une image en couleur. Mais il est aussi possible de faire de l'interpolation, ce qui permet d'obtenir une image à la taille de la matrice, mais pour cela il va falloir "tricher". Comme nous l'avons vu, pour chaque pixel de la matrice nous avons une information sur une couleur. Pour obtenir une image à la taille de la matrice il va falloir imaginer les informations des autres couleurs au niveau de chaque pixel. Pour ceci nous allons nous aider des informations des pixels qui juxtaposent notre pixel. A partir des informations des pixels voisins nous allons imaginer les informations qui nous manquent, en supposant que l'image scannée ne présente pas de variations brusques au niveau de ses couleurs. Ainsi nous obtenons une image en couleurs qui possède la résolution de la matrice.

COMPARAISONS ENTRE CCD ET CMOS

CMOS: plus économique à la production
moins gourmand en énergie
permet un accès à chaque pixel

CCD: consommateur de puces
meilleure résolution

Nous pouvons conclure en disant que les capteurs CCD sont utilisés pour le matériel haut de gamme. Tandis que le matériel bas de gamme l'utilisation de capteurs CCD et CMOS est comparable.

Ces notion précisées, nous pouvons aborder scanners, appareils photo et caméra numériques.

G - 1 Scanners

L'ancien temps où les graphismes se faisaient directement sur un ordinateur à l'aide d'une souris, ou même d'un crayon optique est quasiment révolu.

Avant le scanner, il y a toujours eu la tablette graphique qui est effectivement encore utilisée aujourd'hui mais... beaucoup que du temps où le scanner n'existait pas.
Une des raisons qui permet aux professionnels chargés du graphisme de jeux vidéos d'utiliser un dispositif de numérisation graphique de papier tel que le scanner de manière efficace est la

suivante : si à l'époque la résolution et le nombre de couleurs étaient tels qu'un infographiste se devait de bien choisir sa palette, le positionnement et la couleur de ses pixels (pixel par pixel), ce n'est plus le cas aujourd'hui en raison du fort accroissement des résolutions chromatiques et spatiales des jeux micro-consoles et arcades qui ne nécessite plus vraiment de création graphique aussi optimisée qu'autrefois.
Imaginez faire sur un papier le dessin d'un monde fantastique avec sa princesse, son dragon, ses orcs,... et de le scanner (anglicisme désormais accepté dans la langue française) juste après.
Sur une machine actuelle, après avoir retravaillé/retouché un peu votre image numérisée pour la remettre dans le format graphique de votre écran ne serait ce qu'en 800*600*65536 (X*Y*COULEURS), ça passe très bien, il n'y a quasiment pas de retouche à faire pour obtenir un bon rendu sur l'écran.
Maintenant, si la résolution de votre écran avait été ne serait-ce que su 160 par 100 voir du 320*200... le résultat aurait été professionnellement désastreux, même en ayant recours aux filtres de réductions les plus efficaces (analyse fractale et transformée par ondelettes) et à beaucoup de temps de retouche. Cela vous prendrait au moins autant de tant à faire des retouches, que de temps à recréer directement sur support informatique et sous la résolution en question le graphisme scanné.
Et le résultat serait même probablement de qualité inférieure.

Quoi qu'il en soit, à chaque époque ses techniques, et la notre est à juste titre en faveur des scanners, appareils photo et caméras numériques.

Le scanner est un périphérique entrant qui permet de digitaliser une image à une résolution maximale définie par ces caractéristiques technique, dépendant de la finesse des barrettes CCD utilisée pour le scanner en question.

Il existe 3 types de scanner dont le plus vieux et le scanner à main, le plus courant le scanner à plat, et le plus professionnel/cher, le scanner à tambour.

Le **principe de fonctionnement de ces scanners** est le suivant :

Une source de lumière éclaire le document à numériser. Ce dernier réfléchit la lumière d'une manière différente selon qu'il est plus ou moins foncé. Pour des scanners couleur, on fait d'abord passer la lumière incidente par un filtre correspondant aux trois couleurs fondamentales (rouge, vert, bleu) ce qui permet d'obtenir les réflexions correspondantes à chacune d'elle. Le faisceau lumineux passe ensuite dans un système de miroirs et de lentilles convergentes qui l'envoient sur une barrette de capteurs CCD (coupled charge device) qui convertissent l'énergie lumineuse reçue en une tension électrique proportionnelle à celle-ci ; enfin un convertisseur analogique-numérique transforme cette dernière en une donnée exploitable par l'ordinateur

Le scanner à plat

La source lumineuse est mobile et balaye la plaque de verre sur laquelle est posé l'original. Un miroir se déplace avec elle et se charge "d'envoyer" le résultat à un bloc fixe généralement composé d'un autre miroir et du circuit CCD. Inconvénient, la lumière traverse deux fois le verre (légère perte de luminosité), mais surtout, l'image est obtenue par **réflexion** de la lumière sur l'original. De ceci résulte une très grande perte de lumière et surtout de contraste. Cependant, les progrès de ces types de scanners ont été fulgurants ces derniers mois.

le scanner à tambour

Le rayon de lumière traverse le document (transparent) qui est lui-même monté sur un cylindre de verre rotatif. Un jeu de miroirs assez simple permet d'atteindre trois capteurs photosensibles, un par composante de la lumière.

La caractéristique la plus importante d'un scanner lors du choix d'un modèle demeure sa résolution, exprimée en points par pouce (dpi). Plus elle est élevée, plus le scanner est précis et l'on donne toujours les résolutions horizontales et verticales, car elles sont souvent différentes. La résolution maximale de la numérisation dépend de la densité des cellules photosensibles sur le capteur CCD (résolution horizontale) et du nombre de déplacements élémentaires que le chariot est capable d'exécuter (résolution verticale). .

Mais attention : il y a résolution et résolution.
La plus importante est la résolution optique, encore appelée résolution réelle ou résolution sans interpolation du scanner. En effet, pour améliorer le rendu des documents numérisés, les constructeurs ont parfois recours à une technique d'interpolation : entre deux points effectivement numérisés, le scanner introduit un troisième point, fictif celui-là, dont la valeur se situe à mi-chemin entre celles des deux autres. Ainsi, entre un point gris foncé et un point blanc, le scanner rajoute un point gris clair. On obtient donc une nouvelle résolution, souvent dénommée résolution avec interpolation.
Ce procédé d'interpolation offre deux avantages : il permet d'égaliser les résolutions verticale et horizontale, ce qui facilite le traitement ultérieur de l'image car on dispose alors de points carrés, et il lisse les transitions entre deux points. En revanche, il introduit aussi des erreurs : une rupture franche entre deux points est atténuée par un tel dispositif...

G - 2 Appareils photo et caméras numériques

Voici deux autres champs d’application des capteurs CCD.

Caméras numériques

Très brièvement, le flux de lumière provenant des optiques passe par deux miroirs semi-réfléchissant, chacun des trois flux ainsi obtenu passe par un filtre de couleur et est envoyé sur un capteur CCD qui ne possède aucun filtre. Pour obtenir l'image, il ne reste plus qu'à traiter le signal des trois capteurs CCD.

Appareils photo numériques

Le principe est toujours le même : une optique (objectif) dont on peut régler la mise au point et l’ouverture (objectif) focalise la lumière réfléchie par la scène sur la matrice de capteurs CCD. Pour le reste, ce sont les schémas de fonctionnement des CCD et des mémoires (généralement

électromagnétiques) pour stocker les information numérisée.
Il y généralement une petite électronique prévue pour la compression des images acquises.

Exemple d'appareils photo numériques Fuji, utilisant des capteurs CCD:

A droite :
Résolution : 3040*2016
Capteurs : 23,3*15,6
mm

A gauche :
Résolution : 2400*1800
Capteurs : équivalent à

H - Conclusion

Cette étude, et donc ce rapport ont été rédigé dans le sens d'une compréhension de l'intérêt (utilité, coût, niveau existence, applications, comparaisons de caractéristiques technique) et du principe (général et technique (aspect théorique et pratique)) chacune des technologies et techniques employés dans le cadre de la réalisation ou interaction avec un jeu vidéo.

Dans mes recherches bibliographiques, j'ai chaque fois cherché tout ce que je pouvais trouver comme information sur chaque sujet donné, puis j'ai résumé le tout suivant le niveau d'actualité et de clarté technique des informations trouvées.
Il y a de nombreuses sources d'informations que j'ai découvertes et que je n'ai pas eu le temps d'exploiter.
Je compte refaire ultérieurement une version plus complète et avec un plan différent, et entre autres en m'orientant vers les parties techniques et technologies logicielles.

Au niveau des domaines technologiques globalement mis en jeux dans ces systèmes, il n'y a pas encore de véritable prédominance.
Il est clair que le domaine de technologie optronique est celui sui sera le plus amené à se développer dans les prochaines années.
En effet, dans le cadre de jeux vidéos, l'avenir n'est autre que la réalité virtuelle, et la réalité virtuelle nécessite tes technologies rapides et souples (optique) et bien entendu une connexion à l'informatique (électronique). Qui plus est, si on considère l'électromagnétisme comme faisant parti de domaine aux frontières très floues de l'optronique, alors oui, la mécanique et les autres sous domaines ne susciteront quasiment plus de programme de recherches et ne feront plus guère l'objet d'évolutions.

Maintenant, toutes ces interfaces sont impressionnantes, mais il est vrai que si l'on veut se permettre d'utiliser des langages vraiment évolués (rapidité de création, mais lenteur d'exécution) tel que le VRML (langage de création de mondes de réalité virtuelle) et de s'immerger dans des jeux vidéos d'une complexité et d'un réalisme (loi physiques, comportement humains et animaux, graphisme d'apparence quasi réelle,...) sans cesse accrue, il v nous falloir changer radicalement la structures de nos machine, ordinateurs et consoles.

Devant la limite à la miniaturisation et à l'intégration de transistors dans les processeurs actuels, je vois 2 tendances d'évolution se profiler :
- Dans un premier temps, le calcul partagé et parallèle avec une excellente gestion des ressources

systèmes tout en gardant le principe toujours actuel d'évolution des processeurs
- L'appel des nouvelles technologies qui pour l'instant n'en sont qu'à leurs balbutiements : l'ordinateur optique / quantique / biologique.

Dans un vision de l'avenir nettement plus courtes, je pense que les supports de jeux vidéos tendront à devenir individuels spatialement et partagés grâce aux réseaux de télécommunications en voie de diminuer énormément leur lenteur de débit et leur coût (réseau tout optique, WDM, TDM,...).
La console sera certainement amenée à disparaître au profit d'un outil multimédia et connecté unique (tels que le sont déjà actuellement nos ordinateurs actuels).
De même, l'objectif, l'utopie actuelle des aficionados de la réalité virtuelle serait de disposer d'une seule combinaison de donnée sensori-motrice qui pourrait remplacer tous les autres interfaces crées jusqu'alors.
La connexion cérébrale directe et bidirectionnelle pour la communication bidimensionnelle des réactions et conséquences de réactions avec un ordinateur totalement multitâche temps réel et doté d'une intelligence humaine sinon supérieure serait le summum de cette utopie ... au jour d'aujourd'hui !!

Mais gare à l'égarement, se retrancher dans le virtuel devient très vite un danger pour soi comme pour son entourage. Peut être vaudrait-il mieux freiner les évolutions technologiques dans ces domines...

I – Glossaire et équivalents

> CRT : CATHOD RAY TUBE : tube cathodique
> LED : DEL : Light Emitting Diode : diode électroluminescente
> ddl : degré de liberté
> 'data glove' = gant de donnée
> feedback : à retour de force et/ou retour tactile
> HMD : HEAD MOUNTED DISPLAY : visiocasque
> I^2 sensori-motrices, mentales et fonctionnelles : immersion et interaction (caractéristiques fondamentales de la réalité virtuelle) :

* sensori-motrices : sujet connecté à l'ordinateur par ses sens et ses réponses motrices via des interfaces matérielles. Sont concernés les aspects informatiques temps réel pour l'ordinateur, les aspects physiques pour les interfaces matérielles et les aspects psychophysiques pour les caractéristiques sensori-motrices du sujet.

* mentales : sujet immergé mentalement dans le monde virtuel, la conscience d'existence physique d'I^2 sensori-motrices devant lui être mentalement invisible (transparent). Sont concernés les processus mentaux exploités par le sujet et la modélisation comportemental du monde virtuel.

* fonctionnelles : concerne les objectifs de l'application de réalité virtuelle. Ces objectifs s'attachent à réaliser une immersion et une interaction du sujet pour des fonctionnalités données et non pour une simple immersion mentale de l'homme dans ce monde virtuel. Ces fonctionnalités sont décomposables en Primitives Comportementales Virtuelles (PCV)

> joystick : manette
> joypad : gamepad / joystick
> motion capture : capture de mouvement : technique visant à numériser le mouvement d'un corps (localisation de positions 3D de points dans le temps)
> joypad : gamepad / joystick
> LCD : Liquid Crystal Display = affichage à cristaux liquides
> PALC : afficheur à technologie plasmatron
> PCV : Primitives Comportementales Virtuelles : Quand le sujet se trouve en environnement virtuel, il a une activité générale qui se décompose en activités élémentaires, (sensori-motrices et mentales), appelées PCV. Ces dernières peuvent être regroupées en quatre catégories en environnement virtuel :

***** observer le monde virtuel ;

***** se déplacer dans le monde virtuel ;
***** agir sur le monde virtuel ;
***** communiquer avec autrui.

> PDP : afficheur à technologie plasma
> traqueur : capteur de localisation
> visiocasque : systèmes de visualisation stéréoscopique complet
> visiolunette : lunette coordonnée à un afficheur stéréoscopique exploitant une technique donnée
> trackball : souris « renversée »
> VR : virtual reality : RV : réalité virtuelle

J - Bibliographie

Cette bibliographie reste encore incomplète en raison du nombre important d'informations que j'ai récupéré dans diverses et nombreux, compte rendus de congrès, thèses, sites www, rapports de stages, encyclopédies et revues spécialisées,...

>P. Fuchs, G. Moreau, J.P. Papin , les Presses de l'Ecole des Mines, novembre 2001 - 5 *«Le traité de la réalité virtuelle»*
>Milgram, P., Drascic, D. (1996). *«Perceptual issues in augmented reality»*.
>In Proceedings of the SPIE, vol 2653 (Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III), pages 123 ╥134, San Jose (CA).
>K. Pimentel and K. Teixera,1994 *«La Réalité virtuelle. . .de l'autre coté du miroir»*
>B. Jolivalt, Que sais-je 1996 «La réalité virtuelle»
>Applied Optics, p4699 V34N32 - 3D display system based on a holographic screen and microcomputer-driven galvanometersV34N22 - V34-8 p1364 - V34N17 p 3180- V33N29 p6860 - V37N4 p 663...
> Mesures 676 p65 - 680 - 689 p94 -700 p73 ...
> La recherche 248 p1330 - ...
> Pour la science J1987 p90 - ...
>Industrie et techniques 20/09/86 p69-10/04/91 p13 - 747 M1994 - 754 N1994 - ...
>T. Morineau, P. Chedmail et M. Parenthoën,2001*« An affordance-based model to support simulation in Virtual Environmenrt* »,
>S. Le Breton «Systèmes de poursuites du regard dans les domaines médicaux et militaires»
>W. Barfield,2000C. Hendrix, O. Bjorneseth, K.A Kaczmarek, and W. Lo-tens, 1995 «Comparison of human senseury capabilities with technical specifications of virtual environment equipment»
>G. C. Burdea,1996 «Force and touch rétroaction for virtual reality»
>C Carello, P. Fitzpatrick & M.T Turvey,1992 «Haptic probing : Perceiving the length of a probe and the distance of a surface probed»
>J. Ehrlich, E.M. Rodriguez, S. L. Goldberg ,1999 «The Haptic Interface in Virtual Reality»
>A.Holley et G. Sicard, 1994 «Les récepteurs olfactifs et le codage neuronal de l'odeur»
>A. (Ed.) Iggo,1973 «Handbook of sensory physiology : Somatosensory système»
>J.M. Kinsella-Shaw & M.T. Turvey, 1992 «Haptic perception of object distance in a single-strand vibratory web».
>S.J. Lederman & R.L. Klatzky, 1987 «Hand movements : A window into haptic object recognition».
> J. Mery, 1971 «Le bruit, aspects physiques et physiologiques»
> J. Perrin, 1998 « Profondeur et binocularité : algorithmie, étude psycho-physiqueet intérêt pour l'ergonomie des interfaces stéréoscopiques »
> J.Plantier, J.P. Menu, C. Roumes,1990 « caractérisation optique d'un système de génération d'images stéréoscopiques »,
> C. W. Tyler, 1991 « The horopter and binocular fusion, Binocular vision,volume 9 de Vision and visual dysfunction »

> F. Raab et E. Blood,1979 *«Magnetic position and orientation tracking system»*,> M. Sato, 2001« Evolution of Spidar »
> A. Villarroya Arranz et J. W. Flanigan,1994 *«New tracking system for VReatity based in ultrasonics and using transputer*s»
> J. F. Wang, V. Chi et H. Fuchs, 1990 «A real-time optical 3D tracker for HMD systems»
> p185-191, congrès 1994 «Interface des mondes réels et virtuels», Montpellier,
> S. Valente and J. ╓L. Dugelay,.2000 ╨*Face tracking and realistic animations for telecommunicant clones*╤.
>T. Heap,1995 *«real-time hand tracking and gesture recognition using smart snakes»,*
> P. Berkelman, R. L. Hollis1997 *«Dynamic Performance of a Magnetic Levitation Haptic Device*»
> C. Cadoz,1994 *«Le retour d'effort dans la communication gestuelle avec lamachine*»
>ACROE, congrès 1994 «Interface des mondes réels et virtuels»,Montpellier
> F. Gosselin,2001 *«Etat de l'art des Organes de Commande pour la Réalité Virtuelle*»
> J. Eichenlaub,1990, *«Autostereoscopic display for use with a personal computer».*
>D.E. Holgrem,1994 *«Scanner laser displays for virtual reality».*
>E. Kaneko,1987 *«Liquid Crystal TV Display : Principles and applications of liquid Crystal Display»,*
>G. BONNIER et E. DEVIN,1987 « Thermocouples »
>Encyclopédie Techniques de l'Ingénieur, tome 1, 1987 « Mesures et Contrôle », article R2590, Vol.R 3, 1997.
>…

WWW

http ://www.simteam.com - VR Systems http ://www.ndirect.co.uk/ vr-systems
Capteurs électromagnétiques
Ascension Technolgy Corp. http ://www.ascension-tech.com - General Reality Company http ://www.genreality.com
- InterSense http ://www.isense.com - Polhemus http ://www.polhemus.com - Precision Navigation Inc. http ://www.precisionnav.com
Capteurs acoustiques
Alps Electric LTD http ://www.alps.ie - InterSense http ://www.isense.com - Logitech http ://www.vrdepot.com/vrteclg.htm
- Pegasus Technologies http ://www.pegatech.com - Science Accessories Corp. http ://bei.moscow.com/sac.html
- Visualization and Media Systems Design http ://viswiz.gmd.de
Capteurs optiques
- Charnwood Dynamics http ://www.charndyn.com - Northern Digital Inc. http ://www.ndigital.com
Interfaces visuelles ┘ support fixe
Ecrans d'ordinateur triple ou stéréoscopique et lunettes associées
Dimension Technologies Inc. http ://www.dti3d.com - I-O Display Systems http ://www.i-glasses.com - Nuvision http ://www.nuvision3d.com
- Panoram Technologies http ://www.panoramtech.com - Stereographics http ://www.stereographics.com - Vrex http ://www.vrex.com
Fenêtre immersive
Virtual Research Systems http ://www.virtualresearch.com
Visiobureaux
Barco http ://www.barco.com - Elumens Corporation http ://www.virtual-reality.com - Fakespace Systems http ://www.fakespacesystems.com
- TAN http ://www.tan.de/english/intro.html
Visiosalles et visiocubes
EVL of University of Illinois http ://www.evl.uic.edu/pape/CAVE - Fakespace Systems http ://www.fakespacesystems.com -
SEOS Displays LTD http ://www.seos.co.uk - Silicon Graphics Inc. http ://www.sgi.fr - TAN http ://www.tan.de - Vrex http ://www.vrex.com
Interfaces visuelles portables
Visiocasques CRT
BAE-Reflectone http ://www.unites.uqam.ca/grri/publications - Fakespace Systems http ://www.fakespacesystems.com -
Fakespace Labs http ://www.fakespacelabs.com - Kaiser Electro-Optics http ://www.keo.com - n-Vision http :// www.nvis.com -
Virtual Research Systems http ://www.virtualresearch.com.P. Fuchs, G. Moreau, J.P. Papin 361
Visiocasques LCD
Cybermind http ://www.cybermind.co.uk - Interactive Imaging Systems http ://www.iisvr.com/NSindex.html -
Kaiser Electro-Optics http ://www.keo.com - SEOS Displays LTD http ://www.seos.co.uk - Virtuality Group http ://vtd.fel.tno.nl/ virtgrp
- Virtual Research Systems http ://www.virtualresearch.com
Vidéolunettes
Canon http ://www.canon.jp - Cgsd http ://www.cgsd.com - Cy-Vis http ://www.personaldisplay.com - Hitachi http ://www.hitachi.com -
InterSense http ://www.isense.com - I-O Display Systems http ://www.i-glasses.com - Liquid Image http ://www.liquidimage.ca -
MicroOptical http ://www.microopticalcorp.com - MicroVision http ://www.retinaldisplays.com - Olympus http ://www.eye-trek.com -
Optics 1 http ://www.optics1.com - Personal Mointor http ://www.personalmonitor.com - Siemens http ://www.siemens.com -
Sony http ://www.cybermind.nl - Virtual Vision http ://www.virtualvision.com - Xybernaut Corporation http ://www.xybernaut.com
Visiocasques semi-transparents
ReachIn Technologies http ://www.reachin.se - Page de comparaison de visiocasques http ://www.stereo3d.com/hmd.htm. -
Interfaces ┘ retour thermique
CM Research http ://www.cmresearch.com/haptic.html
Interfaces ┘ retour tactile
Retour tactile pneumatique
UK's Robotics Research Center http ://www.hitl.washington.edu/scivw/EVE
Retour tactile ┘ matrice d'aiguilles
Transdimension http ://www.transdimension.com - Unitech Research http ://www.execpc.com/%7Eunitech -

Engineering Acoustics, Inc. http ://www.eaiinfo.com/page5.html.P. Fuchs, G. Moreau, J.P. Papin 281
Retour tactile par vibrations
Virtual Technologies http ://www.virtex.com
Retour tactile par manette
IBM http ://www.almaden.ibm.com/cs/user - Logitech http ://www.vrdepot.com/vrteclg.htm
Retour tactile par électrodes cutanées
BioControl Systems http ://www.biocontrol.com
Mixage virtuel et réel
CGSD Corporation http ://www.cgsd.com/TOPIT.html http ://www.cnrs.fr/SDV
Interfaces ل retour d'effort à réaction externe
Interfaces classiques ل réaction externe à structure série
Cybernetix http ://www.cybernetix.fr - Haption http ://www.haption.com - MPB Communications http ://www.mpb-technologies.ca/space - Sensable http ://www.sensable.com
Interfaces classiques à réaction externe à structure parallèle
ForceDimension http ://www.forcedimension.com - Nissho Electronics http ://www.tradepia.or.jp/nevc -
Virtual Reality and Active Interfaces http ://imtsg7.epfl.ch
Interfaces à structure particulière.P. Fuchs, G. Moreau, J.P. Papin 267
Immersion Corporation http ://www.immersion.com - Biorobtics Lab. http ://rcs.ee.washington.edu/BRL -
Virtual presence http ://www.vrweb.com - Iwata Lab. http ://intron.kz.tsukuba.ac.jp/HM/txt.html
Manettes à retour d'effort
Biorobotics Laboratory Washington Univ. http ://www.ornl.gov/Library/biorobotic.htm -
Matra Marconi Space http ://www.apgate.com/elec/company - Robotics Institute Carnegie Mellon Univ. http ://www.cs.cmu.edu
Hans Walischmiller GmbH http ://www.hwm.com/products/joyarm
Souris à retour d'effort
Immersion Corporation http ://www.immersion.com - Logicad3D http ://www.spacemouse.com
Interfaces à retour d'effort à réaction interne
Exosquelettes
Incorporation http ://www.bdi.com - Sarcos http :/www.sarcos.com/teleprod.html - Virtual Technologies http ://www.virtex.com
Gant de données avec retour d'effort
LRP http ://www.robot.uvsq.fr/lrp - Rutgers University http ://vizlab.rutgers.edu/burdea - Virtual Technologies http ://www.virtex.com
Gant de données
Ascension http ://www.ascension-tech.com - Essential Reality http ://www.essentialreality.com - Fifth Dimension http ://www.5dt.com -
Fakespace Labs http ://www.fakespacelabs.com - Nissho Electronic Corp http ://www.tradepia.or.jp/nevc/advanced/vr -
Sarcos http ://www.sarcos.com - Virtual Technologies http ://www.virtex.com
Commande avec la tête
Cybernet http ://www.cybernet.com
Souris 3D
3Dconnexion http ://www.3dconnexion.com - Logitech http ://www.vrdepot.com/vrteclg.htm - Spacetec http ://www.immersion.com
Capture de mouvement
Principe optique
Actisystem http ://www.actisystem.fr - Character Shop http ://www.Character-Shop.com - Charnwood Dynamics http ://www.charndyn.com
Qualitys http ://www.qualisys.com - Mikromak http ://www.mikromak.com - Northern Digital http ://www.ndigital.com -
Motion Analysis http ://www.motionanalysis.com - Motek http ://www.motek.org - Vicon http ://www.vicon.com -
XD Productions http ://www.xdprod.com -
Principe électromagnétique
Ascension Technolgy Corp. http ://www.ascension-tech.com - Polhemus http ://www.polhemus.com -
Simulation http ://www.simulationfx.com/mocap.html
Principe mécanique
Capture du mouvement des levres http ://herens.idiap.ch/¢ luettin - Character Shop http ://www.Character-Shop.com -
INA http :/ /www.ina.fr - Northern Digital Inc. http ://www.ndigital.com - SimGraphics http ://www.simg.com - X-IST http ://www.x-ist.de
Oculomètres
SensoMotoric Instruments http ://www.smi.de - LC Technologies Inc. http ://www.eyegaze.com
Capteurs physiologiques
Moto Development Group http ://www.moto.com.
…