

TECHNIQUE CHIRURGICALE

Commande du microscope par le regard appliquée à la microchirurgie ophtalmologique.

J.R. CHARLIER (1), P. SOURDILLE (2), M. BEHAGUE (1), C. BUQUET (1) (Lille, Nantes)

ABSTRACT :

Gaze controlled microscope for ophthalmic microsurgery.

This article presents a system of oculomotor control of the microscope used in ophthalmic microsurgery. An eye movement sensor has been integrated within the microscope lens. The information provided by this sensor is used to control the position of the microscope with no alteration of the surgeon's visual functions and no interference with his visual sensori-motor reflexes. Results have been obtained from laboratory experimentations as well as from a series of anterior and posterior segment surgical procedures. They demonstrate the high precision and sensitivity of the gaze control which can be used to compensate for the reduction of the field of vision resulting from the optical magnification of the microscope.

Key words : Microsurgery. Microscope. Eye movements. Automation.

RESUME :

Commande du microscope par le regard appliquée à la microchirurgie ophtalmologique.

Les auteurs présentent un dispositif de commande par le regard du microscope utilisé en microchirurgie ophtalmologique. Un capteur intégré aux oculaires du microscope fournit la direction du regard du chirurgien. Cette information est utilisée pour commander les déplacements du microscope à l'aide d'algorithmes ne perturbant pas la perception visuelle et compatibles avec les réflexes sensorimoteurs visuels. Les résultats obtenus lors d'évaluations de laboratoire et durant une série d'opérations des segments antérieur et postérieur de l'œil mettent en évidence la grande précision et la sensibilité de ce mode de commande qui permettent de compenser la réduction de champ résultant du grandissement optique du microscope.

Mots clés : Microchirurgie. Microscope. Mouvements oculaires. Automatisation.

INTRODUCTION

Depuis les premières expérimentations de Perrit à Chicago en 1945 [10] et, entre autres, les travaux de Littman [7], Harms et Mackensen [5], la microscopie opératoire est devenue d'utilisation courante en ophtalmologie. Le grandissement procuré par le microscope a entraîné une évolution considérable des techniques opératoires. Cependant, ce grandissement n'a pas que des avantages : il entraîne une perte du champ visuel et de la profondeur de champ

qui nécessite des réglages fréquents du microscope en cours d'opération.

Les solutions actuellement disponibles pour effectuer les réglages du microscope sont loin d'être réellement satisfaisantes. L'aide d'un assistant qui exécute les instructions données verbalement est une solution coûteuse, dont le temps de réponse est important, et qui présente des risques d'erreur non négligeables. La commande à l'aide d'un pédalier offre des possibilités de commande limitées avec risque de confusion dans les situations d'urgence. Elle suppose une grande habileté de la part du chirurgien qui devient un véritable « homme orchestre ». La commande vocale avec reconnaissance automatique de la parole est bien adaptée à des actions en tout ou rien, tels que l'allumage ou l'extinction d'une lampe. Elle s'avère moins satisfai-

(1) U 279 INSERM, 1, rue Calmette, F-59019 Lille Cedex.

(2) Clinique Sourdille, 1, place Anatole-France, F-44000 Nantes.

Tirés à part : J. CHARLIER, à l'adresse ci-dessus.
Définitivement accepté le : 11 mars 1992.

sante pour des réglages continus, tels que le centrage du microscope ou la mise au point. Sa fiabilité est altérée lors des modifications de l'intonation de la voix ou des changements du niveau sonore ambiant.

L'utilisation d'une commande par le regard est une idée tout à fait séduisante dans le contexte de la microchirurgie. C'est en effet le moyen le plus direct pour indiquer où se porte l'attention du chirurgien. C'est une idée déjà ancienne.

L'asservissement de systèmes d'armes à la direction du regard a été décrit dès 1968 [1]. D'autres applications ont été proposées pour l'aide à la communication des handicapés moteurs et pour le travail sur console d'ordinateur [4, 12].

L'application à la commande du microscope opératoire pose cependant des problèmes spécifiques, en particulier la mesure des mouvements oculaires et la réalisation d'un asservissement de la position du microscope n'amenant pas de perturbation de la vision du chirurgien. Cet article décrit les méthodes qui ont été développées pour résoudre ces problèmes, ainsi que les résultats obtenus lors des premières évaluations de laboratoire et au cours d'une série d'opérations du segment antérieur et du segment postérieur de l'œil.

MATERIEL ET METHODES

Mesure de la direction du regard

La direction du regard du chirurgien est déterminée à l'aide d'une méthode optique différentielle, basée sur le principe de Hirschberg [6] qui consiste à mesurer la position du reflet d'une source lumineuse sur la cornée par rapport à l'image de la pupille. Ces deux images se déplacent simultanément lors de translations de l'œil, leur mouvement relatif fournit une mesure de l'orientation de l'œil indépendante des mouvements de la tête.

Le capteur de mouvements a été intégré à l'oculaire du microscope grâce à une miniaturisation des différents éléments optiques (fig. 1). Il comprend trois voies optiques distinctes. La voie visible correspond à la vision habituelle du chirurgien au travers de l'oculaire du microscope ①. L'éclairage de l'œil dans le proche infrarouge (880 nm) est obtenu par une diode électro-luminescente ⑤.

Le recueil de l'image de l'œil du chirurgien comprend un miroir ②, une lentille de focalisation ⑥, un séparateur ④ et un capteur à

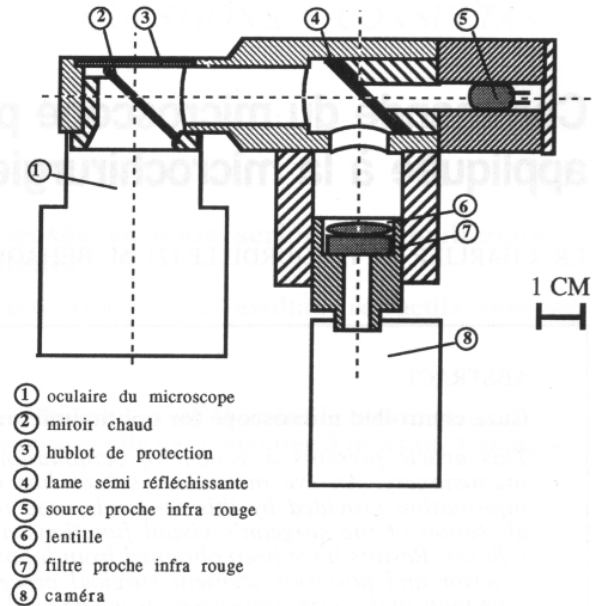


Fig. 1. - Schéma optique du dispositif de commande du microscope par le regard.

transfert de charges ⑧. L'image fournie par le capteur est traitée par un système électronique qui en extrait de façon automatique les positions de la pupille et du reflet cornéen à partir desquelles est déterminée la direction du regard [2, 3, 8].

Contrôle des déplacements du microscope

La commande du microscope par le regard n'est pas un simple problème de désignation. En effet, toute action sur le microscope a une répercussion directe sur l'image vue par l'observateur, créant une boucle de rétroaction (système optique oculaire, oculomètre, système de commande, système optique auxiliaire) qui se superpose à celles déjà présentes au sein du système sensori-moteur visuel (système optique oculaire, image rétinienne, système sensoriel, système moteur) (fig. 2).

Cette boucle de rétroaction supplémentaire doit être conçue de façon à ne pas perturber la perception visuelle du chirurgien et à obtenir des modalités de commande par le regard aussi « naturelles » ou réflexes que possible.

Les algorithmes réalisant la commande des déplacements du microscope découlent d'un

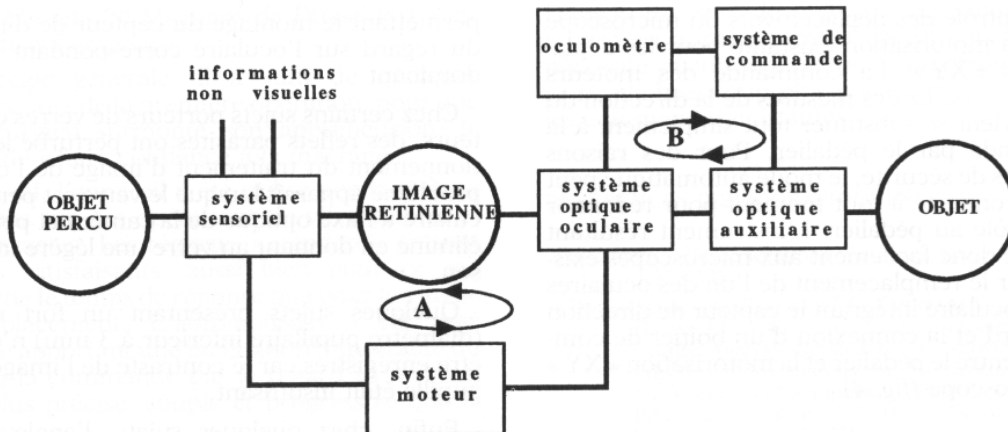


Fig. 2. – Schéma de principe du système sensori-moteur visuel incluant une aide optique (microscope) commandée par le regard. A : boucle de rétroaction sensorimotrice visuelle, B : boucle de rétroaction introduite par la commande par le regard.

modèle simplifié du système visuel. Un premier sous-système est responsable de l'analyse des formes détaillées. Il présente les meilleures performances dans une zone « de vision centrale » correspondant anatomiquement à la macula. Un deuxième sous-système assure la détection de la présence ou du mouvement d'un objet sur la totalité du champ de vision. La détection d'un objet en vision périphérique déclenche un mouvement rapide de l'œil amenant cet objet dans la zone de vision centrale où peut être réalisée son analyse détaillée.

L'analyse des formes d'un objet peut également être effectuée lorsque celui-ci se déplace à vitesse lente, inférieure à environ 10 degrés par seconde, grâce à un mécanisme de poursuite, ou « tracking », assurant le maintien de cet objet dans la zone de vision centrale.

Les principes de la commande des mouvements du microscope découlent de ce modèle :

- le regard du chirurgien, en dehors ou aux limites du champ de vision du microscope, est interprété comme la désignation d'un objet en vision périphérique. Dans ce cas, le microscope se déplace à vitesse maximale pour ramener cet objet dans le champ de vision. Un temps de validation est introduit avant l'exécution de la commande afin d'éliminer d'éventuelles erreurs ;

- lorsque l'objet désigné arrive dans le champ de vision du microscope, le système de vision centrale est capable d'en assurer la capture, l'analyse et la poursuite, à la condition que la vitesse de déplacement ne soit pas trop élevée.

Pour amener l'objet au centre du champ du microscope, où la vision est plus « confortable », le déplacement s'effectue à une vitesse suffisamment lente pour permettre la poursuite visuelle et la perception des détails.

Le champ de regard du microscope est donc divisé en trois zones correspondant à des protocoles de commande des mouvements du microscope distincts (fig. 3) :

- une zone centrale sans déplacement du microscope ;
- une zone intermédiaire où les déplacements se réalisent à vitesse lente vers la zone centrale ;
- une zone périphérique où les déplacements s'effectuent à vitesse maximale jusqu'à la zone intermédiaire.

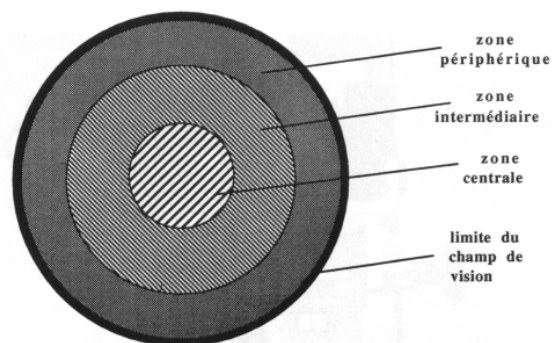


Fig. 3. – Délimitation des trois zones de commande du microscope.

Le contrôle des déplacements du microscope utilise la motorisation existante pour les déplacements « XY ». La commande des moteurs élaborée à partir des mesures de la direction du regard vient se substituer tout simplement à la commande par le pédalier. Pour des raisons évidentes de sécurité, le mode automatique peut être déconnecté à tout moment pour redonner le contrôle au pédalier. L'instrument résultant s'adapte donc facilement aux microscopes existants par le remplacement de l'un des oculaires par un oculaire intégrant le capteur de direction du regard et la connexion d'un boîtier de commande entre le pédalier et la motorisation « XY » du microscope (fig. 4).

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Tests préliminaires

Des essais préliminaires ont été effectués sur un groupe de 80 chirurgiens dans le but d'évaluer la fiabilité du fonctionnement de l'appareil.

Dans plus de 90 % des cas, le dispositif de commande par le regard s'est avéré fonctionner immédiatement de façon satisfaisante, sans autres réglages que ceux effectués habituellement sur le microscope : distance interpupillaire, correction des erreurs de réfraction et mise au point. Il n'a pas été nécessaire d'effectuer un apprentissage ou une initialisation préalable.

Différents problèmes ont été rencontrés chez moins de 10 % des sujets testés.

Lorsque l'œil directeur n'est pas celui sur lequel la direction du regard est mesurée, les erreurs d'évaluation de la zone fixée par le chirurgien peuvent atteindre plusieurs degrés. Ce problème devrait être résolu à l'avenir en

permettant le montage du capteur de direction du regard sur l'oculaire correspondant à l'œil dominant.

Chez certains sujets porteurs de verres correcteurs, des reflets parasites ont perturbé le fonctionnement du traitement d'image de l'œil. Ce problème apparaît lorsque le verre est perpendiculaire à l'axe optique de la caméra et peut être éliminé en donnant au verre une légère inclinaison.

Quelques sujets présentant un fort myosis (diamètre pupillaire inférieur à 3 mm) n'ont pu être enregistrés car le contraste de l'image de la pupille était insuffisant.

Enfin, chez quelques sujets, l'angle kappa entre l'axe optique de l'œil et l'axe pupillaire était notablement différent de la valeur moyenne de 5 degrés utilisée pour le réglage initial de l'appareil. Ce problème a été résolu par une initialisation de l'appareil en position primaire du regard.

Aucun des sujets testés n'a fait de remarque sur l'inconfort pouvant résulter de la réduction de distance entre l'œil et l'oculaire, cette dernière étant ramenée de 25 à 10 mm par l'intégration du dispositif de mesure de la direction du regard.

La plupart des sujets testés se sont déclarés satisfaits des réglages initiaux des paramètres déterminant le fonctionnement du système de commande : limite de la zone centrale à 30 % du champ du microscope, limite de la zone intermédiaire à 60 %, temps de validation en zone périphérique de 1 s et vitesse de déplacement en zone intermédiaire de l'ordre de 2 degrés par seconde.

Quelques rares sujets ont cependant préféré des réglages permettant le fonctionnement le plus rapide possible : limite de la zone centrale à 25 % du champ du microscope, limite de la zone intermédiaire à 50 %, temps de validation en zone périphérique de 200 ms.

Trois sujets ont de prime abord été déroutés par le fonctionnement de l'appareil, indiquant qu'il fonctionnait « à l'envers ». Cependant, ce malentendu a été vite dissipé lorsque ces sujets ont porté leur attention sur une tâche visuelle, plutôt que sur le principe de fonctionnement de l'appareil.

Tests au bloc opératoire

L'évaluation au bloc opératoire a été conduite, d'une part à la clinique Sourdirille de Nantes avec les Docteurs Sourdirille et Ducourneau, d'autre

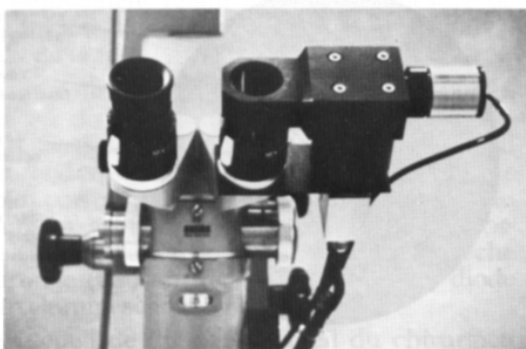


Fig. 4. - Présentation générale de l'appareil.

part à l'hôpital St-Martinus de Dusseldorf avec le Docteur Lemmen.

En règle générale, il a suffi de quelques minutes, lors de la première opération, pour que le chirurgien surmonte son appréhension, le temps de « faire confiance à la machine ».

Au total, l'appareil a été utilisé pendant deux semaines sur des opérations de vitrectomies et de cataractes. Les réglages « standard » se sont révélés satisfaisants, aussi bien pour ce qui concerne le temps de réponse que pour la vitesse de déplacement. L'automatisme a été jugé comme apportant une facilitation importante du travail, la commande par le regard se révélant bien plus précise, souple et progressive que le pédalier.

Les observateurs présents dans la salle d'opération ont pu par ailleurs apprécier le centrage permanent du champ de visée du système vidéo.

CONCLUSION

Cette étude démontre la faisabilité et l'intérêt d'une commande automatique du centrage du microscope opératoire à partir de la direction du regard.

Des solutions originales ont été développées pour mesurer la direction du regard du chirurgien et commander les déplacements du microscope. L'instrument résultant s'adapte facilement aux microscopes existants, par le remplacement de l'un des oculaires par un oculaire intégrant le capteur de direction du regard et la connexion d'un boîtier de commande entre le pédalier et la motorisation « XY ».

Des expérimentations de laboratoire portant sur 80 sujets, ainsi que 2 semaines d'opérations de vitrectomie et de cataracte ont permis de valider les solutions qui ont été développées.

Dans la majorité des cas, la commande par le regard est immédiatement opérationnelle et ne nécessite aucun réglage ou apprentissage. Elle se révèle beaucoup plus précise et sensible que les commandes existantes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ABBEY. – Guide weapons of aircraft, *US patent*, 1968, 3 375 375.
- [2] CHARLIER J.R., BARISEAU J.L., CHUFFART V., MARSY F., HACHE J.C. – Real time pattern recognition and feature analysis applied to eye movement and pupillary reflex analysis. In : « Proceedings of the 6th Visual Field Symposium, Heijl A., Greve E.L. Eds », *Dr Junk W Publishers*, Dordrecht, The Netherlands, 1985, 181-189.
- [3] CHARLIER J.R., SOURDILLE P., BEHAGUE M., BUQUET C. – Eye controlled microscope for surgical applications. *Dev Ophthalmol*, 1991, 22, 154-158.
- [4] GRAFT C.P. – Apparatus being controlled by movement of the eye. *US patent*, 1978, 4 109 145.
- [5] HARMS H., MACKENSEN G. – Microsurgery of the eye. *Yearbook Medical Publishers*, Chicago, 1967.
- [6] HIRSCHBERG J. – Über die Messung des Schielgrades und die Dosierung der Schieloperation. *Zentrabl Prakt Augenheilkd*, 1885, 8, 325.
- [7] LITTMAN H. – Ein neues Operations-Mikroskop. *Klin Mbl Augenheilk*, 1954, 124, 473-476.
- [8] MERCHANT J., MORRISSETTE R. – Remote measurement of eye direction allowing subject motion over one cubic foot of space. *IEEE Trans BME*, 1974, 21, 309-317.
- [9] PATKIN M. – Ergonomics of the operating microscope. *Adv Ophthalmol*, 1978, 37, 53-63.
- [10] PERRIT R.A. – The operating microscope in practice. *Adv Ophthalmol*, 1968, 20, 21-23.
- [11] SAUTTER H. – The development of microsurgery. In : « Ophthalmic microsurgery. Instrumentation, Microscopes, Techniques, Draeger J. Ed », *Karger*, Bâle, 1987, 5-11.
- [12] TELTSCHER. – Command of musical instrument and typewriter by a paraplegic, *US patent*, 1976, 3 986 030.