

DISS. ETH Nr. 12000

**Miniaturisierbare digitale
Echtfarben-CCD-Video-Kamera für
endoskopische
Applikationen in der Medizin**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
ADRIAN VON ORELLI
Dipl.El.-Ing.ETH
geboren am 29. Dezember 1967
von Basel-Stadt, Zürich und Locarno

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. P. Niederer, Referent
Prof. Dr. W. Fichtner, Korreferent

1997

Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Konzept eines dedizierten digitalen Echtfarben CCD Videosystems konnte gezeigt werden, dass die Bildqualität der aktuell in medizinischen Applikationen eingesetzten Standard-Videotechnik bezüglich den Parametern Auflösung, Rauschen und Farbproduktion deutlich verbessert werden kann. Das Konzept des neuen Videosystems ist mit vertretbarem technischen Aufwand realisierbar. Diese Aussagen konnten mit den beiden, während der Arbeit aufgebauten, funktionstüchtigen Prototypenkameras untermauert werden.

Die mit der Kamera erzielte Auflösung kann nur mit einer starren Optik¹ oder mit einem sehr dicken Bildbündel ausgeschöpft werden. Der Einsatz einer starren Optik erfordert im endoskopischen Einsatz die Integration der Kamera in das Handstück. Das entwickelte Konzept sieht daher die Aufteilung des Kamerasystems in einen miniaturisierbaren Kamerakopf und ein externes Controllermodul vor. Die Systemarchitektur wurde so gewählt, dass durch die Aufteilung keine Beeinträchtigung der Bildqualität entsteht.

Die mit einem Videosystem erreichbare Bildqualität hängt von einer Vielzahl, sich gegenseitig beeinflussender, Parameter ab. Die Auslegung eines Kamerasystems läuft somit auf das Auffinden der, für die vorgesehene Applikation, optimalen Abstimmung der Systemparameter hinaus, was deren exakte Kenntnis erfordert. Die Analyse der die Bildqualität beeinflussenden Faktoren ist daher ein wichtiger Teil dieser Arbeit. Schwerpunkte bilden dabei folgende Teilaspekte: Die Aufbereitung des analogen Ausgangssignals des CCD Sensors mit der *Correlated Double Sampling* Stufe, die Quantisierung des Analogsignals, die Erzeugung des synchronen Timings, die Treiberstufen der Schieberegister, die Datenübertragung, die *on-line* Korrektur der Bilddaten, die Struktur des Farbmosaikfilters, die *on-line* Aufbereitung der Farbinformation, die spektralen Eigenschaften des CCD-Sensors und der Beleuchtung im Hinblick auf die Echtfarbenreproduktion und ein passives digitales Autofokussystem.

Die in dieser Arbeit vorgenommene Auslegung der Systemparameter² stellt aus heutiger Sicht den optimalen Kompromiss für ein Videosystem dar, welches in endoskopischen Applikationen im speziellen, aber auch im medizinisch-wissenschaftlichen Umfeld im allgemeinen eingesetzt wird. Die bessere Bildqualität im Vergleich zu Standard-Video ermöglicht die Erschließung neuer Einsatzgebiete. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Auswertung der Kamerabilder mit Bildverarbeitungsmethoden zur Diagnoseunterstützung, da hier die bessere Bildqualität am stärksten zum Tragen kommt.

¹Mit starrer Optik ist GRIN oder konventionelle Optik im Gegensatz zu einem flexiblen Bildbündel gemeint.

²Auflösung 1024x1024 Pixel, Bildfrequenz von 30Hz, Signal zu Rauschverhältnis 60dB, Ein-Chip Kamera mit Farb-Mosaikfilter und Aufteilung in Kamerakopf und Controller.

Die Analyse aller Rauschquellen, welche die Signalqualität des CCD-Sensors limitieren ergab ein SNR von 60dB. Aufgrund dieses Wertes wurde die Auflösung bei der Signalquantisierung mit 10 Bit ausgelegt.

Die Charakterisierung der entwickelten analogen Signalaufbereitungsstufe zeigt, dass diese die erforderlichen 60dB SNR bei einem Pixeltakt von 20MHz erreicht. Sie weist im weiteren eine Bandbreite auf, die ausreicht um von einem Pixel zum nächsten einen Sprung über den ganzen Aussteuerungsbereich auszuführen und auf einen Restfehler von einem Promille einzuschwingen.

Das Timing der Steuersignale beeinflusst das SNR der Kamera massiv. Das Konzept des am *Institut für Integrierte Systeme der ETHZ* entwickelten Timinggenerator-ASIC hat sich in diesem Zusammenhang sehr bewährt. Die Ableitung aller Steuersignale von einer einzigen Taktquelle, welche mit der achtfachen Pixelfrequenz arbeitet, ist zu einem guten Teil für die erreichte Signalqualität der Kamera verantwortlich.

Mit der Bestimmung der MTF³ wurde die optische Leistungsfähigkeit der Kamera als Gesamtsystem bestimmt. Die mit einer modifizierten *Knife Edge* Methode ermittelte MTF des Kameraprototypen stimmt gut mit der theoretischen Limite, gebildet durch die Pixelapertur und die Beugung an der Blende überein. Die MTF weist bei der Nyquistgrenze einen Wert von 33% auf.

Die hohe Reproduzierbarkeit der Offset- und Verstärkungsdisparität der Pixel des CCD-Sensors ist der Grund dafür, dass mit einer *on-line* Korrektur der Bilddaten die Bildqualität verbessert werden kann. Ein in Zusammenarbeit mit dem *Institut für Integrierte Systeme der ETHZ* entstandenes ASIC führt die *on-line* Korrektur der Bilddaten in Echtzeit aus. Die Analyse der Disparitäten des CCD-Sensors ergab, das 6 Bit Koeffizienten bei der Offsetkorrektur und 10 Bit Koeffizienten bei der Verstärkungskorrektur die besten Resultate erbringen.

Von den verschiedenen evaluierten Farbmosaikfilteranordnungen weist das 2G-Mosaik in Kombination mit dem vorgestellten digitalen *on-line* Farbinterpolations Algorithmus die besten *allround* Abbildungseigenschaften auf. Mit Simulationen und Experimenten konnte gezeigt werden, dass sich die Abbildungseigenschaften des entwickelten Ein-Chip Kamera Systems bei den meisten Objekten nur unwesentlich von denen einer Drei-Chip Kamera, welche CCD-Sensoren der gleichen Auflösung aufweist, unterscheiden.

Das Funktionsweise des entwickelten passiven Autofokussystems basiert ausschliesslich auf der Bewertung der digitalen Bilddaten in Echtzeit. Das Autofokussystem kommt somit ohne zusätzliche optische Komponenten im Kamerakopf aus, was einen wichtigen Punkt im Hinblick auf die Miniaturisierung darstellt.

³Modulation Transfer Function

Abstract

A concept of a dedicated high resolution digital true color CCD video system for medical applications, in particular for use in endoscopy is presented. In comparison to present video norms according to PAL and NTSC, the new system exhibits an improved image quality defined in terms of resolution, color reproduction and noise. Two prototype cameras demonstrate that the developed concept can be realized with acceptable effort.

The high resolution of the camera can only be exploited with rigid⁴ optics or an image bundle with a large diameter. The use of rigid optics in endoscopic applications implies the integration of the camera in the handpiece. The presented camera system consists therefore of two parts, i.e. a miniaturized handheld camera head and an external controller module. During the development of the concept care was taken that no reduction in image quality results from this separation of the functions.

The image quality achievable with a video system depends on numerous, interacting parameters. The design of a camera consists mainly of searching the application specific optimal balance of all system parameters. The analysis of the factors influencing the image quality was an important part of the work. Main aspects were the analog signal processing of the CCD signal with correlated double sampling, the quantization of the analog signal, the generation of the synchronous timing, the driving stages of the shift registers, the data transmission, the online correction of the image data, the spectral properties of the CCD sensor and the illumination regarding the true color reproduction and a passive autofocus system.

The balance of the system parameters⁵ in the presented design promise to be an optimal choice in view of an application in endoscopy requiring high resolution in combination with true color reproduction. Besides, there exist many other fields, that could profit from the superior image quality such as microscopy and ophthalmology.

The analysis of all noise sources limiting the signal quality of the CCD sensor under the given operating conditions showed that an SNR of 60 dB is achievable. A 10 bit signal quantization was therefore chosen.

The characterization of the analog signal processing stage showed the feasibility of a correlated double sampling stage with a pixel clock of 20MHz in combination with the desired SNR of 60dB. The available bandwidth is sufficient to support a signal jump over the entire dynamic range from one pixel to the next and to settle to one per mille from the end value.

⁴Rigid optics are conventional or GRIN optics in contrast to flexible fiber bundles.

⁵Resolution 1024x1024 pixel, frame rate 30 Hz, signal to noise ratio (SNR) 60dB, one chip camera with mosaic color filter and system architecture with camera head and controller module.

The timing of the CCD control signals has a major influence on the SNR of the output signal. The realized timing generator ASIC developed at the *Integrated System Laboratory ETHZ* is to large extent responsible for the achieved image quality. All timing signals are derived from a single clock running at the eight fold pixel clock.

On the basis of the MTF⁶ the optical performance of the camera system was qualified. The MTF of the prototype camera was determined with a modified *Knife edge method*. It is in good agreement with the theoretical limit determined from the pixel aperture and the diffraction limit at the given f-stop. The MTF has a value of 33% at the Nyquist limit.

Due to the good reproducibility of the offset and gain variation of each pixel, the image quality can further be improved with online correction of the image data. Again in cooperation with the *Integrated System Laboratory ETHZ* an ASIC was developed, that performs the online correction of the image data in realtime. Each pixel has a 6 bit offset correction and a 10 bit gain correction coefficient.

Various color mosaic filter patterns were evaluated. The 2G pattern, in combination with the digital online color interpolation algorithm was found to exhibit the best allround properties. By way of computer simulation and experiments it could be demonstrated, that images acquired with the present one chip camera show only minor differences in comparison to images acquired with a three chip camera with CCD-sensors having the same resolution.

The novel passive autofocus system is based on the evaluation of the digital image data in realtime. There is no need for additional optical components in the camera head, an important aspect for miniaturization.

⁶Modulation Transfer Function