

Hochauflösendes Echtfarben Video System für minimal invasive Applikationen

von Orelli A., Lehareinger Y., Niederer P., Heynemann T.#

Institut für Biomedizinische Technik und Medizinische Informatik
ETH und Universität Zürich, 8044 Zürich, Schweiz
Institut für Integrierte Systeme ETH Zürich, 8035 Zürich, Schweiz

EINLEITUNG:

Die Verbesserung der Bildqualität des Videokamera-Systems ist ein Schlüsselement bei der Entwicklung und Etablierung neuer Applikationen in der minimal-invasiven Chirurgie. Typische Anwendung sind die computer- und roboterunterstützte Mikrochirurgie und die Ophthalmologie. Die heute in der Medizin eingesetzten Videosysteme basieren auf der CCIR 601 Norm, in Europa normalerweise als PAL-Signal kodiert. Mit dieser ursprünglich für die Unterhaltungselektronik entwickelten Technologie sind die Anforderungen an Auflösung, Reproduzierbarkeit (Rauschen) und getreue Farbproduktion, welche sich in medizinischen Applikationen stellen, nicht befriedigend zu erfüllen.

METHODE:

Eine signifikante Verbesserung der Bildqualität ist mit der bestehenden Videonorm nicht möglich. Es wurde daher ein dediziertes digitales Einchip Farb-Video-System mit folgenden Spezifikationen entwickelt: Bildrate variabel zwischen 1 und 30 Hz ohne Zeilensprung frei synchronisierbar, Darstellungsfrequenz mindestens 60 Hz, Bildformat: 1024 * 1024 Pixels, Dynamik: 60 dB (10 bit), Mosaikfarbfilter mit digitaler Interpolation der fehlenden Farbinformation, online Korrektur von Verstärkung und Offset auf Pixelbasis und auf Bildverarbeitung basierender digitaler Autofokus.

Das Konzept umfasst die Realisierung eines miniaturisierbaren Kamerakopfes und eines externen Controllermoduls. Der Kamerakopf enthält den temperaturstabilisierten CCD-Sensor mit Farbmosaikfilter, die analoge Signalaufbereitungsstufen, die Analog-Digital Wandler, den Timinggenerator, sowie einen seriellen Highspeed-Datenlink zur Kontrollereinheit und die Optik mit Autofokusfähigkeit. Im Controllermodul befindet sich die Elektronik für die digitale Farbinterpolation, die online Bilddatenkorrektur, die Beleuchtungssteuerung, die Berechnung des Autofokus-kriteriums und der Bildspeicher für Bildratenkonversion und Darstellung.

Die Bildqualität eines digitalen CCD Videokamera-Systems wird hauptsächlich durch den CCD-Sensor, dem Signal-zu-Rausch-Verhältnis und der Bandbreite der analogen Signalaufbereitungsstufe, der Jitterfreiheit der Steuersignale sowie die Farbinterpolationsalgorithmen und die Online-Korrektur beeinflusst. Den aufgeführten Kriterien wurden bei der Entwicklung mit folgenden Massnahmen Rechnung getragen: Die Generierung der Steuersignale wurde mit einem konfigurierbaren, 160 MHz getakteten ASIC realisiert. Alle Steuersignale sind in Nanosekunden Inkrementen feinjustierbar. Das

Kameraystem weist zwei weitere ASIC Implementationen auf. Erstens den Highspeed-Datenlink zwischen Kamerakopf und Controller und zweitens die Online-Farbinterpolation und pixelbasierte Bilddatenkorrektur. Die analoge Signalaufbereitungsstufe ist so ausgelegt, dass sie über den ganzen Dynamikbereich des CCD Sensors von einem Bildpunkt zum nächsten auf ein Promille einschwingt. Für die Charakterisierung der analogen Signalaufbereitungsstufe wurde ein CCD-Signalgenerator entwickelt, welcher CCD-Signalförmigkeiten mit einem Pixeltakt von bis zu 30 MHz mit 12 Bit Auflösung generieren kann. Dieser zeitdiskrete arbiträre Signalgenerator erwies sich als absolut notwendiges Werkzeug bei der Optimierung der analogen Signalaufbereitungsstufe.

Die Abbildungseigenschaften der entwickelten Farbinterpolationsalgorithmen wurden anhand umfangreicher Simulationen optimiert. Es wurden bei der Evaluation zwei verschiedene Mosaikfarbfilter Anordnungen in Betracht gezogen. Das angestrebte Optimierungsziel war die Kombination von optimalen Abbildungseigenschaften mit einer in dedizierter Elektronik implementierbaren Architektur. Die Realisation des Algorithmus ist aufgrund der Echtzeitanforderung an die Verarbeitung der Videobilder unumgänglich.

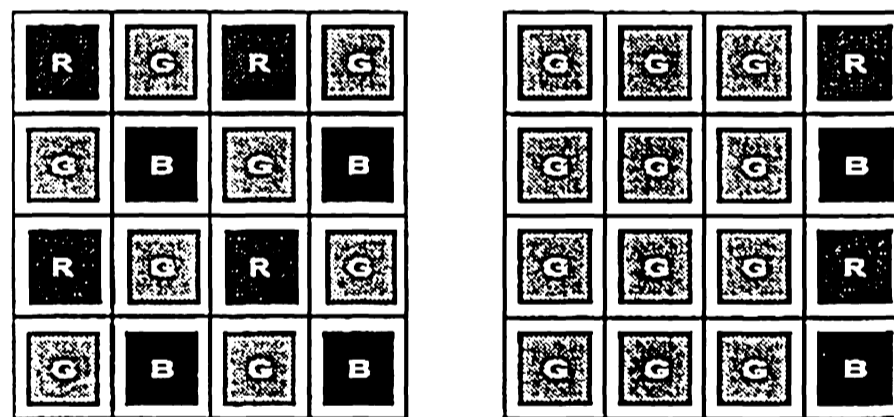


Abbildung 1. Die beiden evaluierten Farbmosaikfilter

Die Temperaturstabilisierung des CCD-Sensors ist mit einem Peltierelement und einem digitalen Regelkreis realisiert. Sie garantiert eine maximale Temperaturabweichung vom Sollwert von 0.1 Grad. Die Solltemperatur ist zwischen 15 und 30 Grad einstellbar.

ERGEBNISSE:

Die mit dem noch nicht miniaturisierten Prototypen System erreichte Bildqualität erfüllt die gestellten Anforderungen. Sie ist in Bezug auf Auflösung, Rauschen, Dynamik wie auch dem subjektiven Bildeindruck deutlich besser als diejenige moderner Dreichip-Kameras

nach der bestehenden Videonorm. Die auf Abbildung 1 dargestellte Modulation-Transfer-Funktion (MTF) belegt, dass die erreichte Auflösung nahe an der theoretischen Limite, gebildet durch die endliche Pixelapertur und die Beugungsbegrenzung an der Blende, liegt. Die MTF wurde mit einer modifizierten "Knife Edge" Technik bestimmt.

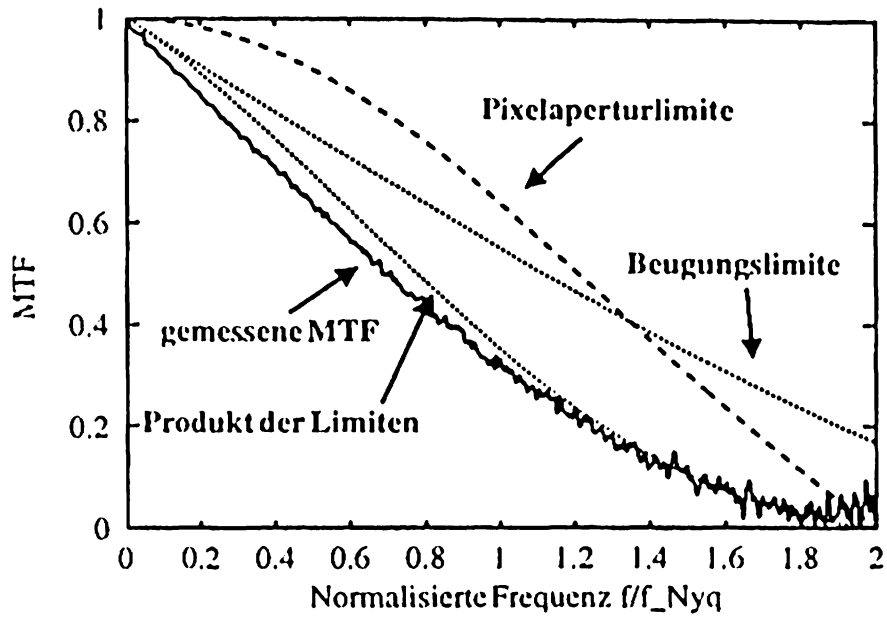


Abbildung 2.

Die Reproduzierbarkeit ist auf der Abbildung 3 dargestellt. Das Histogramm vom Differenzenbild zeigt bei zwei aufeinanderfolgenden Dunkelbildern, dass sich 58% aller Bildpunkte um Null oder ein Promille voneinander unterscheiden. Die Signalqualität der Kamera ist bei einer Aussteuerung von mehr als 10% des Dynamikumfangs durch das Photonen-rauschen und nicht durch das Rauschen der Kamera-Elektronik limitiert.

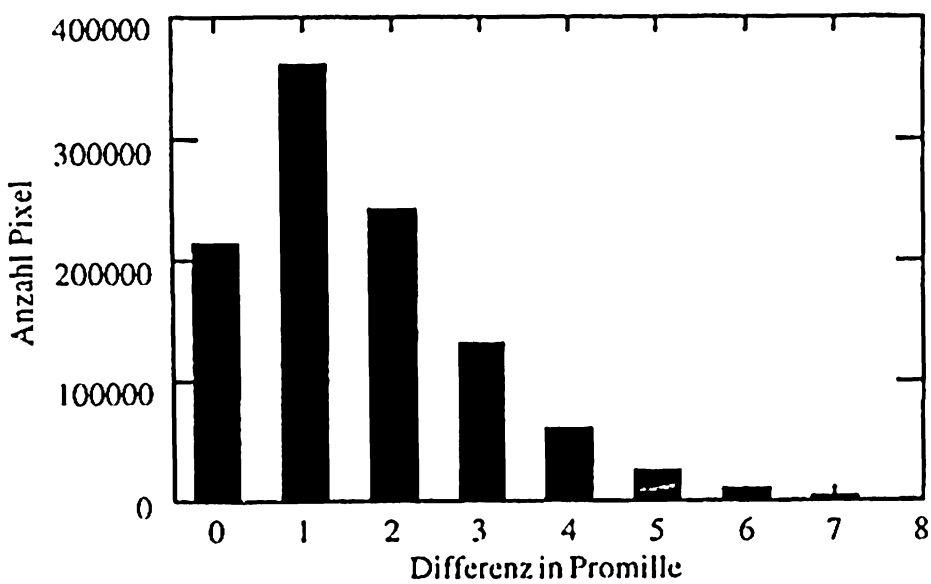


Abbildung 3.

Die Messung der Linearität des Kameraausgangssignales wurde durch Variation der Integrationszeit bestimmt. Der Sensor wurde für die Messung vollständig abgedunkelt. Das gemessene Signal stammt daher ausschliesslich vom Dunkelstrom, welcher aufgrund der Temperaturstabilisierung über die Zeit konstant ist. Der Regressionskoeffizient R^2 beträgt 0.99996.

Abbildung 4 zeigt eine 1:1 Abbildung eines Oesophaguspräparates. Das markierte Quadrat ist auf Abbildung 5 vergrössert dargestellt.

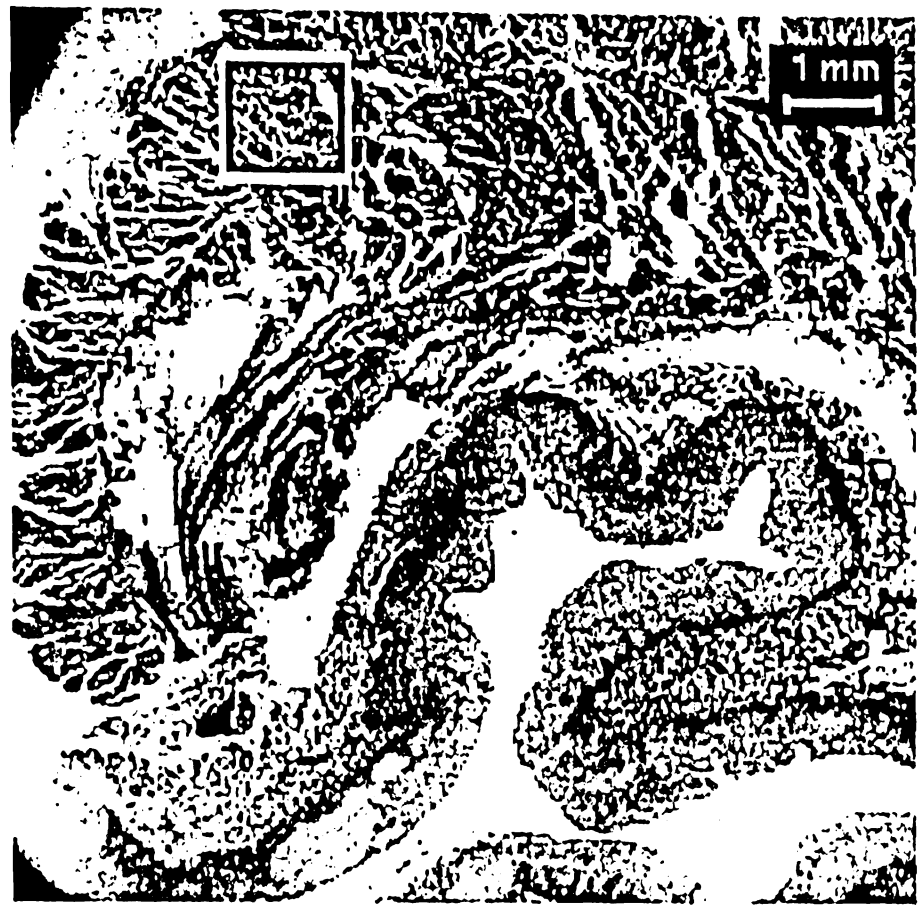


Abbildung 4. Oesophaguspräparat

Der abgebildete Ausschnitt hat eine Fläche von 1,5% des gesamten Bildes. Die feinsten auf der Vergrößerung erkennbaren Strukturen weisen eine Abmessung von $9\mu\text{m}$ auf was der Grösse eines Pixels entspricht.

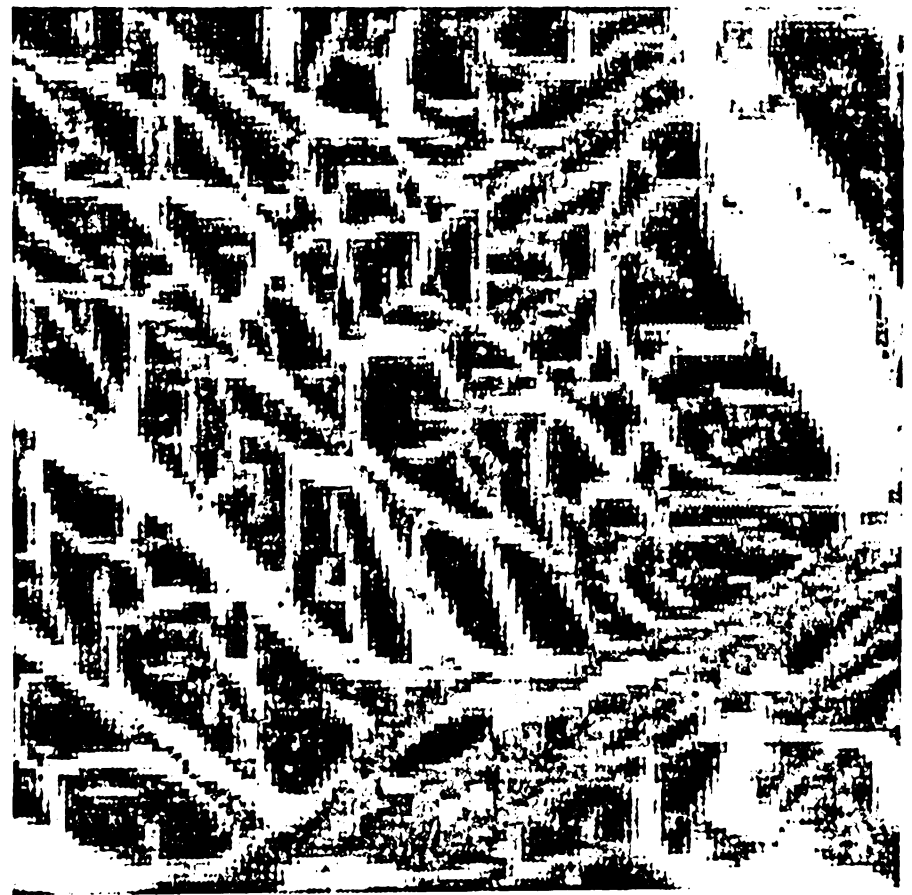


Abbildung 5. Vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 4.

DISKUSSION:

Mit dem Prototypensystem wurde gezeigt, dass mit einer digitalen Einchip-Videokamera, durch Optimierung aller involvierter Teilsysteme, eine deutliche Verbesserung der Bildqualität gegenüber heutigen Standard-Dreischip-Kameras, erreichbar ist. Ein weiterer Vorteil des entwickelten Kamerasystems ist das Konzept bedingte Miniaturisierungspotential.