Trennung von diffuser und spiegelnder Reflexion in Farbbildern des Larynx zur Untersuchung von Farb- und Formmerkmalen der Stimmlippen

Ch. Palm, I. Scholl, T. Lehmann, K. Spitzer

Institut für Medizinische Informatik und Biometrie
RWTH Aachen, Pauwelsstr. 30, 52057 Aachen
chripa@vaire.imib.rwth-aachen.de

Zur diagnostischen Unterstützung bei der Befundung laryngealer Erkrankungen soll eine Farb– und Formanalyse der Stimmlippen durchgeführt werden. In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur Trennung der spiegelnden und diffusen Reflexionsanteile in Farbbildern des Larynx vorgestellt. Die Farbe der diffusen Komponente entspricht dabei der beleuchtungsunabhängigen Objektfarbe, während deren Wichtungsfaktoren als Eingabe für Shape-from-Shading–Verfahren zur Oberflächenrekonstruktion dienen.

Keywords: Dichromatisches Reflexionsmodell, Farbkonstanz, Viertelkreis–Analyse

1 Einleitung und Motivation

Zur Unterstützung der Diagnostik bei laryngealen Erkrankungen werden die Stimmlippen innerhalb des Forschungsprojektes *Digitale Quantitative Laryngoskopie* bei primär organischen Veränderungen im Hinblick auf ihre Farbe und Oberflächenform und bei funktionellen Stimmstörungen auf Bewegungsänderungen [1] mit Methoden der medizinischen Bildverarbeitung untersucht.

Dazu wird der Larynx in direkter Videolaryngoskopie aufgenommen. Ein Lupenlaryngoskop mit aufgesetzter CCD–Kamera ermöglicht die Dokumentation der Untersuchung auf Videoband, das anschließend digitalisiert wird. Diese Methode liefert dem Untersucher scharfe und seitenrichtige Farbbilder (Abb. 1). Durch zusätzlichen Einsatz eines Stroboskops können die Stimmlippenschwingungen untersucht werden.

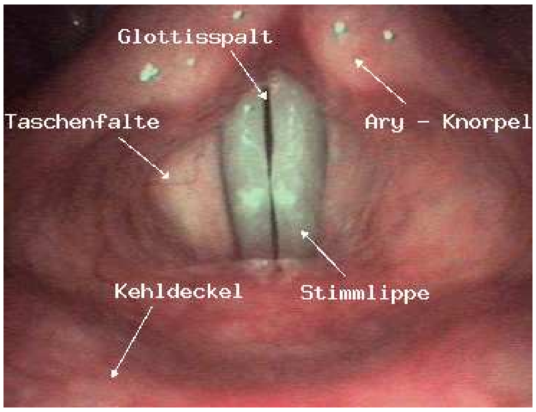

Abbildung 1: laryngoskopisches Bild in Phonation unter Dauerlicht

Bei den primär *organischen* Veränderungen spielt die Farbe als Indikator für eine Materialänderung eine wichtige Rolle:

- Eine *Leukoplakie* z.B. entspricht einer Epithelverdickung, die sich durch weißlich–graue Flecken auf den Stimmlippen darstellt. Sie gilt allgemein als Präkanzerose, d.h. es besteht die Gefahr der Entwicklung eines Stimmlippenkarzinoms.

- Eine *Laryngitis* ist eine Entzündung und manifestiert sich in einer Rotfärbung des Larynx, insbesondere im Bereich der Stimmlippen.

Bislang erfolgte die Beurteilung der Stimmlippenfarbe allein aufgrund der subjektiven Beobachtung des Untersuchers ohne die Möglichkeit einer objektiven Quantifizierung. Auch der Vergleich von Farbwerten bei einem Patienten zu verschiedenen Zeitpunkten bzw. bei verschiedenen Patienten ist nur eingeschränkt möglich, da Aufnahmeparameter wie Geometrie und Beleuchtung nicht konstant bleiben. Das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren liefert die Möglichkeit, die Beleuchtungsfarbe aus dem Farbbild zu eliminieren. Damit lassen sich farbkonstante, ausschließlich auf den materialabhängigen Reflexionseigenschaften der Stimmlippen beruhende Farbparameter bestimmen. Das Verfahren soll außerdem als Preprocessing–Schritt für *Shape-from-Shading*–Verfahren zur Rekonstruktion der Oberflächenform der Stimmlippen eingesetzt werden.

2 Methodik

Ziel des hier vorgestellten Verfahrens ist die Trennung der spiegelnden von der diffusen Reflexion mit Hilfe der Farbinformation, um so einen farbkonstanten, d.h. beleuchtungsunabhängigen Farbparameter zu erhalten.

2.1 Dichromatisches Reflexionsmodell

Nach dem von Shafer [2] vorgestellten Modell stellt sich die spektrale Verteilung des reflektierten Lichts I als Linearkombination aus zwei Komponenten dar: den Spektren der spiegelnden (L_{spieg}) und der diffusen Reflexion (L_{diff}).

$$I(\vartheta, \lambda) = c_{\text{spieg}}(\vartheta) \cdot L_{\text{spieg}}(\lambda) + c_{\text{diff}}(\vartheta) \cdot L_{\text{diff}}(\lambda) \tag{1}$$

mit

$$L_{\text{spieg}}(\lambda) = \beta_{\text{spieg}} \cdot S(\lambda), \qquad L_{\text{diff}}(\lambda) = \beta_{\text{diff}}(\lambda) \cdot S(\lambda) \tag{2}$$

Sowohl der diffus als auch der spiegelnd reflektierende Anteil läßt sich faktoriell in eine ausschließlich von der Wellenlänge (λ) abhängigen Farbkomponente L und eine von der Aufnahmegeometrie (ϑ) abhängige Intensitätskomponente c zerlegen.

Die Spektren der spiegelnden und diffusen Reflexionskomponente wiederum werden durch das Spektrum der Lichtquelle $S(\lambda)$ und den Reflexionseigenschaften des Objekts $\beta(\lambda)$ bestimmt. Treffen die Lichtwellen der Lichtquelle auf das Objekt, so wird ein Teil bereits an der Oberfläche reflektiert (*Oberflächenreflexion*). Vereinfachend wird angenommen, daß diese Reflexion konstant bezgl. der Wellenlänge ist, so daß das Spektrum der spiegelnden Reflexion dem Spektrum der Lichtquelle entspricht.

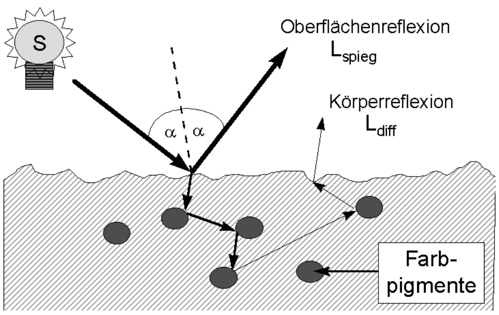

Abbildung 2: Dichromatisches Reflexionsmodell

Ein anderer Teil der Lichtwellen dringt unter die Oberfläche, wird von Farbpigmenten teils absorbiert, teils gestreut und verläßt ohne Vorzugsrichtung (diffus) das Objekt (Abb. 2). Die Verteilung der Farbpigmente bestimmt die diffuse Reflexionseigenschaft des Objekts (*Körperreflexion*). Sie ist materialabhängig und stellt somit letztlich die gesuchte „wahre“ Objektfarbe dar.

2.2 Verfahren

Das vierstufige Verfahren geht von digitalen RGB–Bildern aus und ermittelt zunächst durch Clusteranalyse die Pixel, denen eine gemeinsame Farbe zugeordnet werden kann. Bei mehr als zwei Clustern kann die Beleuchtungsfarbe basierend auf dem Dichromatischen Reflexionsmodell ermittelt werden. Durch eine *Viertelkreisanalyse* [4] können die Farben der diffusen Komponente für die unterschiedlichen Cluster bestimmt und letzlich das Bild pixelweise in ein diffus und ein spiegelnd reflektierendes Bild gesplittet werden.

2.2.1 Farbclusterung

Entscheidend für die Farbclusterung ist die Intensitätsunabhängigkeit. Sie kann durch eine geeignete Wahl des Farbraums (z.B. HSI) oder durch Normierung des RGB–Farbraums erreicht werden (Abb. 3):

$$\mathrm{r} = \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{R}+\mathrm{G}+\mathrm{B}}, \qquad \mathrm{g} = \frac{\mathrm{G}}{\mathrm{R}+\mathrm{G}+\mathrm{B}} \tag{3}$$

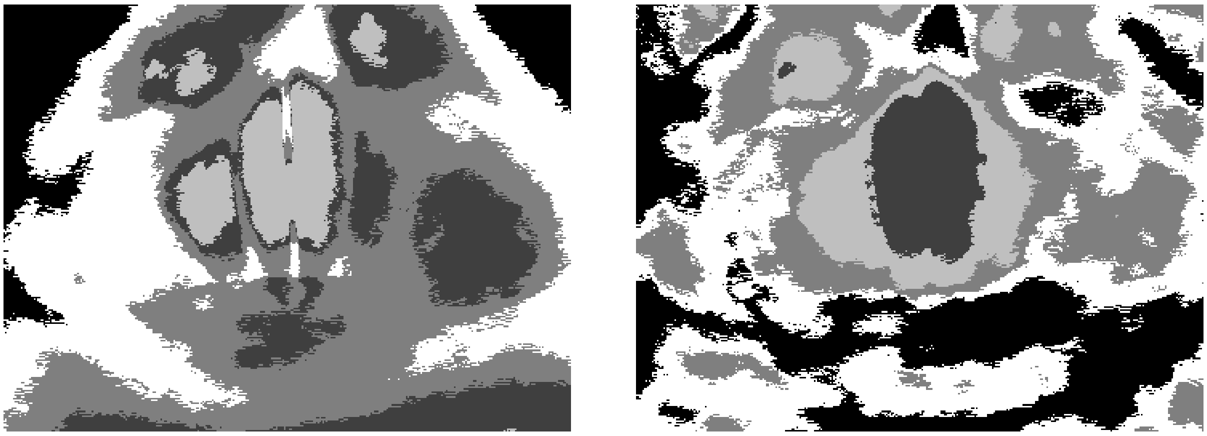

Abbildung 3: Aufteilung des Bildes in 5 Cluster: (links) intensitätsabhängig nach den RGB–Werten, (rechts) intensitätsunabhängig nach den rg–Werten

Im linken Bild der Abbildung 3 wird die Intensitätsabhängigkeit z.B. im gemeinsamen Clusterlabel von linker Taschenfalte und Stimmlippen deutlich, deren *Farbton* stark differiert, deren *Helligkeit* aber ähnlich ist. Die verwendete Clustermethode basiert auf konkurrierendem Lernen und liefert eine Voronoi–Zerlegung des Farbraums [3].

2.2.2 Beleuchtungsfarbe

Ausgehend vom Dichromatischen Reflexionsmodell unterscheidet man zwei Methoden zur Bestimmung der Beleuchtungsfarbe. Die additive Mischung zweier Farben (Beleuchtungs– und Objektfarbe) liefert im 3D–Histogramm eine Ebene, im normierten rg–Diagramm eine Gerade. Sind zwei verschiedenfarbige Objekte im Bild vorhanden, so weist die Schnittgerade der beiden Farbebenen in die Richtung der Lichtquelle, die beiden Ebenen gemeinsam ist. Analog liefert der Schnittpunkt der beiden Farbgeraden im Diagramm die Farbe der normierten Lichtquelle. Das in Abb. 4 dargestellte Histogramm bzw. Diagramm macht die Probleme in dem vorliegenden laryngoskopischen Bildmaterial deutlich. Es sind zwar mehrere Farben vorhanden, sie liegen aber so dicht beieinander, daß herkömmliche Methoden zur Geradendetektion wie Houghtransformation nicht anwendbar sind. Auch eine einfache Clusterung des Diagramms wie in Abb. 3 liefert tendenziell runde Cluster und damit keine gute Einteilung des Bildes in Farben, die im 3D–Histogramm eine Ebene aufspannen.

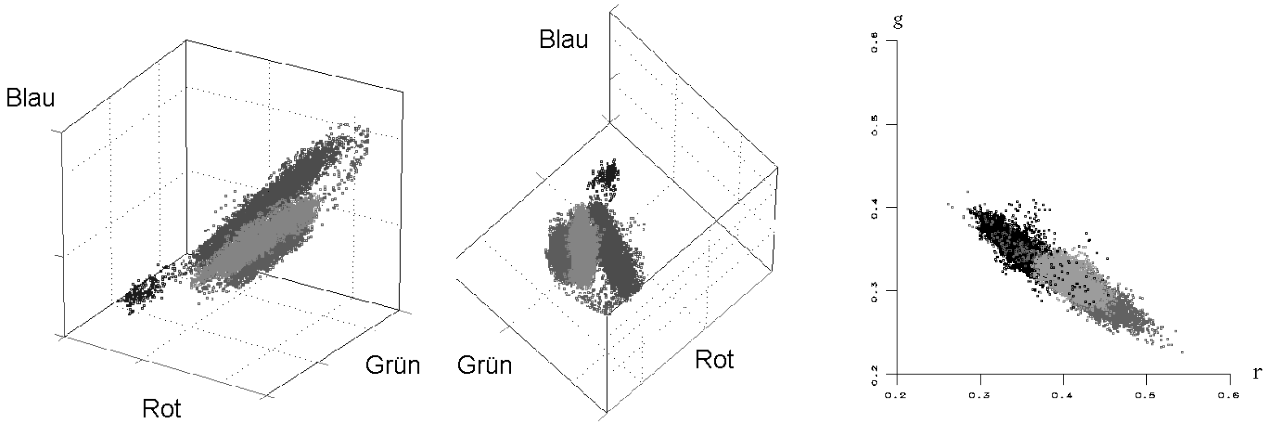

Abbildung 4: (links u. mitte) RGB-Histogramm einiger morphologischer Strukturen des Larynx aus zwei Perspektiven, (rechts) rg–Diagramm derselben Strukturen

2.2.3 Objektfarbe

Ist die Beleuchtungsfarbe bekannt, so kann die Farbe der diffusen Reflexion ermittelt werden. Dazu geht man von der Annahme aus, daß aufgrund der Krümmung der Objektoberfläche in jedem Farbcluster mindestens ein Pixel vorhanden ist, für das der Anteil der Beleuchtungsfarbe gegen Null geht. Die Farbe dieses Pixels läßt sich mit der *Viertelkreisanalyse* [4] feststellen. Hierbei werden die orthonormalen Eigenvektoren, die die Farbebene des Clusters aufspannen, so gedreht, daß ein Eigenvektor in Richtung der Beleuchtungfarbe weist. Die normierten Farbvektoren bzgl. dieser neuen Basis liegen dann innerhalb des ersten Quadranten des Einheitskreises. Als Schätzer der Farbe der Körperreflexion dient die Farbe, die „am weitesten“ von der Beleuchtungsfarbe entfernt ist [4].

2.2.4 Trennung von diffuser und spiegelnder Reflexion

Sind sowohl Körper– als auch Oberflächenreflexionsfarbe bekannt, so kann das Bild pixelweise in seine diffusen und spiegelnden Anteile zerlegt werden. Das ist in eindeutiger Weise mit Hilfe der Moore-Penrose-Inversen möglich. Die diskrete Version des Dichromatischen Reflexionsmodells (1) in Matrixschreibweise lautet:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{R} \\ \mathrm{G} \\ \mathrm{B} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathrm{R}_{\mathrm{spieg}} & \mathrm{R}_{\mathrm{diff}} \\ \mathrm{G}_{\mathrm{spieg}} & \mathrm{G}_{\mathrm{diff}} \\ \mathrm{B}_{\mathrm{spieg}} & \mathrm{B}_{\mathrm{diff}} \end{bmatrix}}_{\mathrm{M}} \cdot \begin{bmatrix} c_{\mathrm{spieg}} \\ c_{\mathrm{diff}} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Für jedes Farbcluster gibt es eine eigene Matrix M, wobei die erste Spalte jeweils identisch ist.

Dann erhält man die Gewichtsfaktoren für die spiegelnde und diffuse Reflexionsfarbe durch Multiplikation der Moore–Penrose–Inversen M^+ mit dem Farbvektor:

$$\mathrm{M}^+ \cdot \begin{bmatrix} \mathrm{R} \\ \mathrm{G} \\ \mathrm{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\text{spieg}} \\ c_{\text{diff}} \end{bmatrix} \qquad \text{mit} \qquad \mathrm{M}^+ = \left(\mathrm{M}^{tr} \cdot \mathrm{M}\right)^{-1} \cdot \mathrm{M}^{tr} \tag{5}$$

3 Ergebnisse und Diskussion

Entscheidender Teil des vorgestellten Verfahrens ist die Bestimmung der Farbe der Spiegelreflexionskomponente. Als problematisch hat sich die schlechte Diskriminierbarkeit der Farben im RGB–Farbraum erwiesen, was bereits in Kapitel 2.2.2 angesprochen wurde. In der Farbbildverarbeitung werden häufig Farbraumtransformationen eingesetzt, insbesondere um eine wahrnehmungsangepaßte Repräsentation der Farben zu erreichen.

Standartisierte Farbräume wie Luv oder Lab wurden getestet, auch weil sie im normierten Farbdiagramm eine Vergrößerung des Rotbereichs zuungunsten des im RGB–Raum überrepräsentierten Grünbereichs bieten. Trotzdem ergab sich keine Verbesserung im Sinne der beschriebenen Problemstellung. Die Lösungsstrategie bestand in einer geeigneten Merkmalsauswahl zur Farbclusterung. Anders als bei einer reinen Clusterung der rg-Merkmale, sollten keine runden, sondern geradenförmige Cluster gebildet werden. Dazu wurden die Farbvektoren nach einem Vorschlag von Tominaga [5] wie in Gleichung (6) normalisiert:

Abbildung 5: Nach dem Merkmal $\bar{\mathrm{r}}$ in 20 Cluster aufgeteiltes Bild

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathrm{r}} \\ \bar{\mathrm{g}} \\ \bar{\mathrm{b}} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} \mathrm{R} \\ \mathrm{G} \\ \mathrm{B} \end{bmatrix} - \overline{m}}{\left\| \begin{bmatrix} \mathrm{R} \\ \mathrm{G} \\ \mathrm{B} \end{bmatrix} - \overline{m} \right\|} \qquad \text{mit} \qquad \overline{m} = \frac{\mathrm{R}+\mathrm{G}+\mathrm{B}}{3} \tag{6}$$

Nach dieser Transformation verbleibt lediglich ein Freiheitsgrad. Als Merkmal zur Clusterung wurde der transformierte Rotkanal $\bar{\mathrm{r}}$ verwendet. Abbildung 5 zeigt das so ermittelte Clusterbild, bei dem 20 Cluster gebildet wurden. Vor allem im Bereich der Stimmlippen zeigt sich eine gute Ausdifferenzierung der einzelnen Farben. In Abbildung 6 ist das rg–Diagramm für einige Cluster, geclustert nach den Merkmalen r und g, dem rg–Diagramm, geclustert nach dem Merkmal $\overline{r}$, gegenübergestellt. Im letzteren Fall ergeben sich Geraden, die sich offensichtlich auch in einem Punkt schneiden, dem Punkt der Beleuchtungsfarbe. Für die so ermittelte Lichtquellenfarbe ergeben sich dann die Gewichtsfaktoren für die spiegelnde und diffuse Reflexionskomponente (Abb. 7). Auffällig ist dabei die Farbenvielfalt auf den Stimmlippen, die mit bloßem Auge kaum wahrnehmbar ist. Sie geht vom

Grün– bis in den Rotbereich. Weiterhin kann die Elimination der Glanzlichter auf den Aryknorpeln beobachtet werden.
In diesem Beitrag wurde ein Verfahren zur Trennung von spiegelnder und diffuser Reflexion in Farbbildern des Larynx vorgestellt. Damit läßt sich eine gute Trennung der Farben auf den Stimmlippen und eine Glanzlichtelimination erreichen, die zur Oberflächenrekonstruktion wichtig ist.

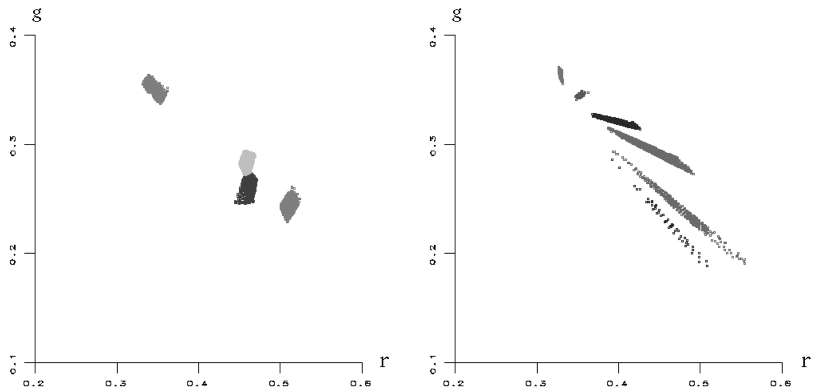

Abbildung 6: rg–Farbdiagramme von Clustern (l.) nach Merkmalen r und g, (r.) nach Merkmal $\bar{r}$

Nachteilig ist die schlechte Differenzierung der Rottöne. Deshalb wird schwerpunktmäßig an der Entwicklung einer geeigneten linearen Verzerrung des Farbraums gearbeitet, die zu einer besseren Trennung der Farbebenen im Rotbereich führt.

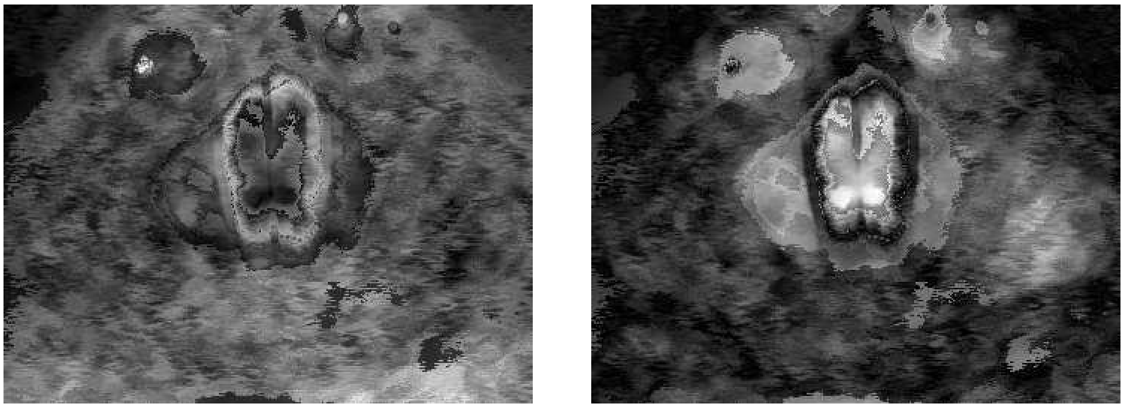

Abbildung 7: (links) Gewichtsfaktoren c_{spieg} der spiegelnden Reflexionskomponente, (rechts) Gewichtsfaktoren c_{diff} der diffusen Reflexionskomponente

Literatur

[1] Sovakar A, Scholl I, Neuschaefer–Rube C, Lehmann T, Spitzer K: Verfolgung und Analyse von Stimmlippenkonturen in laryngoskopischen Videosequenzen. In: Proceedings dieses Aachener Workshops, 1996.

[2] Shafer SA: Using color to separate reflection components. Color Research and Applications, 10: 210–218, 1985.

[3] Uchiyama T, Arbib MA: Color Image Segmentation Using Competitive Learning. IEEE PAMI 16, 12: 1197–1206, 1994.

[4] Tominaga S, Wandell BA: Component estimation of surface spectral reflectance. Journal of the Optical Society of America A, 7: 312–317, 1990.

[5] Tominaga S: Surface Identification Using the Dichromatic Reflection Model. IEEE PAMI 13, 7: 658–670, 1991.