

Entwicklung einer polychromatischen Beleuchtungseinheit für PMD-Kameras

Henrik Lietz*, Jörg Baumgart*, Jörg Eberhardt*

*Labore für Lichttechnik und Technische Optik, Hochschule Ravensburg-Weingarten

<mailto:henrik.lietz@hs-weingarten.de>

Derzeit auf dem Markt verfügbare PMD-Kameras arbeiten gewöhnlich mit Strahlungsquellen im nahen IR-Bereich. Im Folgenden ist die Entwicklung einer leistungseffizienten polychromatischen Beleuchtungseinheit beschrieben, mit der es zusätzlich ermöglicht werden soll Farbbilder zu erzeugen.

1 Einführung

Zur berührungslosen, dreidimensionalen Objekterfassung existieren unterschiedliche Methoden, die abhängig von ihrem Einsatzgebiet ausgewählt werden. Bei kontrastlosen Oberflächen eignen sich sogenannte PMD-Kameras (PMD = Photonic Mixing Device; Photomischdetektor), deren Funktionsprinzip auf der Lichtlaufzeitmessung (Time-of-Flight, kurz: ToF) basiert. Dieses ist ausführlich in [1] beschrieben. Sie geben gleichzeitig ein Entfernung- und Grauwertbild in Echtzeit aus.

Häufig verwenden PMD-Kameras IR-LEDs geringer Lichtleistung (s. Abbildung 1), die lambertsch in den Raum abstrahlen. Daraus ergeben sich augenscheinlich zwei bedeutende Nachteile. Zum einen geht ein großer Teil des Lichts an die Umgebung verloren, welches bei der Detektion fehlt. Zum anderen stört dieses Umgebungslicht bei der Signalmessung. Beides führt zu einem erhöhten Signal-Rausch-Verhältnis der Kamera und verringert ihre Empfindlichkeit. Je geringer die Empfindlichkeit der Kamera, desto geringer ihre Detektionsreichweite.



Abb. 1 Bisher erfolgt die Objektbeleuchtung meist mit IR-LEDs geringer Lichtleistung ohne weitere Kollimationsoptik; z. B.: Mesa Swissranger SR 3000 (links) und PMD Technologies CamCube 2.0 (rechts).

2 Motivation

Als aktives Messverfahren hängt die Messempfindlichkeit einer PMD-Kamera u. a. von deren Beleuchtungseinheit ab. Umso weniger Photonen auf den Sensor treffen, desto schwieriger wird es für diesen das korrekte Signal auszuwerten. Seine Empfindlichkeit nimmt ab. Eine optimierte Strahlformung bündelt das Licht auf die Objektszene und erhöht damit den Lichtstromanteil, der zum Sensor reflektiert wird. Zudem reduziert sie den Störlicht-

anteil, der vorwiegend im Umgebungslicht seine Ursache findet.

Wegen der quasi-monochromatischen Bestrahlung im NIR sind Farbaufnahmen ohnehin nicht möglich. Die IR-LEDs werden durch eine polychromatische (Multi-Color) Beleuchtung ersetzt.

3 Entwicklung der Beleuchtungseinheit

Die eingesetzte High Power Multichip-LED emittiert in den Lichtfarben Rot, Grün, Blau und Weiß. Herstellungstechnisch bedingt sind die vier Emittierflächen örtlich voneinander getrennt. Dies führt bei deren Kollimation zu Farbschatten und Farbrändern. Die Kollimationsoptik konvertiert die örtliche Separation in eine Winkelverschiebung der kollimierten Strahlen relativ zueinander [2]. Abhilfe schafft eine vorhergehende Farbmischung.

3.1 Strahlhomogenisierung

Die Farbmischung erfolgt mit einem sich öffnenden Lichtleiterstab von 50 mm Länge (s. Abb. 2). Durch Totalreflexion an den optischen Grenzflächen (Mantelfläche) wird nahezu das gesamte eingekoppelte Licht im Stab geführt und überlagert. Zudem generiert er für alle eingekoppelten Lichtfarben eine gemeinsame Lichtaustrittsfläche.

Die Güte der Farbmischung hängt maßgeblich von der Anzahl an Reflexionen N im Material ab (1). Dabei ist die Anzahl der Reflexionen proportional zur numerischen Apertur NA_{beam} der Lichtquelle und der Länge L des Lichtleiterstabes und umgekehrt proportional zum materialspezifischen Brechungsindex n sowie der Apertur A des Lichtleiterstabes [3].

$$N \propto \frac{NA_{beam} \cdot L}{n \cdot A} \quad (1)$$

Die sich zum Lichtaustritt hin aufweitende Geometrie verkleinert den Divergenzwinkel des austretenden Lichts um den Faktor M (2) [3], wobei D_{in} und D_{out} die Kantenlängen der Ein-, bzw. Ausgangsapertur sind.

$$M = \frac{D_{out}}{D_{in}} \quad (2)$$

3.2 Strahlentransformation

Eine zweilinsige Kollimationsoptik bildet den Lichtleiterstabaustritt auf die Objektszene ab. Mit dem reduzierten Divergenzwinkel können kleinere Linsendurchmesser gewählt werden und der Einstellbereich der beiden Linsen L_1 und L_2 zueinander nimmt zu. Durch Verschieben der beiden Linsen entlang der optischen Achse, lässt sich die Größe der ausgeleuchteten Fläche an die Objektgröße anpassen.

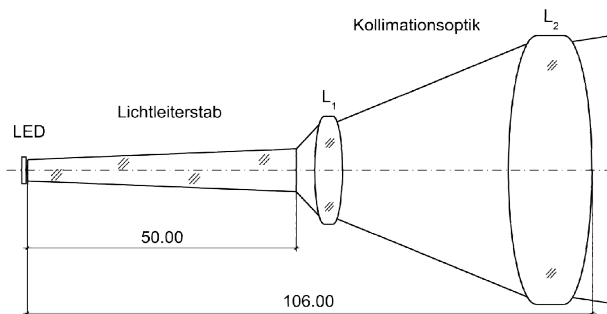


Abb. 2 Das optische Design bestehend aus der High Power Multichip-LED, dem Lichtleiterstab und der zweilinsigen Kollimationsoptik.

3.3 Erzeugung von Farbbildern

Die Erzeugung von Farbbildern mit Hilfe eines Bayer-Filters erscheint wenig sinnvoll, da er die ohnehin schon geringe Auflösung von PMD-Sensoren zusätzlich verringern würde. Deshalb sollen Einzelaufnahmen bei roter, grüner und blauer Objektbeleuchtung zu einem RGB-Composite überlagert werden, wie in Abb.3 veranschaulicht. Ähnliche Verfahren werden bereits erfolgreich in der Astronomie eingesetzt [4].

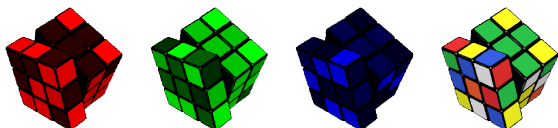


Abb. 3 Die Überlagerung von Einzelaufnahmen bei roter, grüner und blauer Beleuchtung ergibt das RGB-Composite (rechts).

4 Ergebnis

Simulationen zur Beleuchtungsstärkeverteilung und Farbmischung erfolgen mittels ASAP und dienen dem Vergleich (s. Abb. 4).

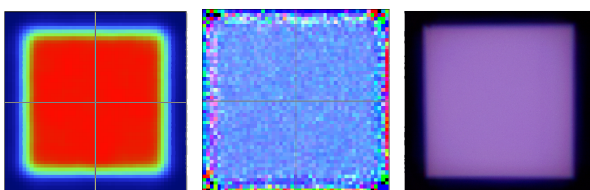


Abb. 4 Simulation der Beleuchtungsstärkeverteilung (links) und Farbmischung (Mitte). Fotoaufnahme der in RGB ausgeleuchteten Fläche auf dem Projektionsschirm (rechts).

Sämtliche Messungen (s. Tab. 1) erfolgen bei Ansteuerung der grünen LED. Ihre elektrische Leistungsaufnahme liegt bei 1,1 W, ihr emittierter Lichtstrom bei 68 lm. Der Projektionsschirm ist 5,0 m von der Lichtleiterstabaustrittsfläche entfernt.

Größe Beleuchtungsfeld	1,32 x 1,32 m ²
Mittlere Beleuchtungsstärke E_v	26,5 lx
Standardabweichung von E_v	$\pm 10 \%$
Opt. Transmissionseff. (Simulation)	79 %
Opt. Transmissionseff. (Messung)	68 %

Tab. 1 Zusammenfassung der Messergebnisse.

Die Beleuchtungsstärkeverteilung zeigt mit einer Standardabweichung von $\pm 10 \%$ eine gute Homogenität. Die Differenz zwischen dem simulierten und gemessenen optischen Wirkungsgrad η_{opt} ist hauptsächlich auf eine gefaste Lichtleiterstabaustrittsfläche zurückzuführen, die in der Simulation nicht berücksichtigt ist. Durch die gefaste Kante wird das Licht vom Objekt weggebrochen und geht verloren. Zudem ist die mechanische Konstruktion zur Lichteinkopplung verlustbehaftet, während sie bei der Simulation als ideal angenommen ist.

5 Zusammenfassung

Die Arbeit zeigt die Entwicklung eines kostengünstigen, strahlungseffizienten und vielseitig anwendbaren optischen Designs zur Kollimation von Multichip-LEDs. Der Lichtleiterstab verhindert das Entstehen von Farbschatten und trägt zu einem hohen optischen Wirkungsgrad des Gesamtsystems von 68 % bei. Optimierungen am mechanischen Aufbau versprechen eine zusätzliche Effizienzsteigerung. Neben der homogenen Beleuchtungsstärkeverteilung besteht die Möglichkeit zur mono- und polychromatischen Beleuchtung der Objektszene. Dies eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten, wie beispielsweise die farbige, dreidimensionale Objekterfassung mittels PMD-Kamera.

Literatur

- [1] R. Lange: „3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD-Technology“ in: *Dissertation* for the degree of Doctor of Technical Sciences (2000)
- [2] T. Bonenberger, J. Baumgart, S. Wendel, C. Neumann: „LED color mixing with diffractive structures“ in: *Proc. SPIE 8641* (2013)
- [3] E. Diaz, M. Knobl: „Prototypenbau von Beleuchtungssystemen aus optischen Standardkomponenten“ in: *Photonik 3/2012*, S. 36-39
- [4] R. Lupton, M. R. Blanton, G. Fekete, D. W. Hogg, W. O'Mullane, A. Szalay, N. Wherry: „Preparing Red-Green-Blue (RGB) Images from CCD Data“ (2003)