

Ein objektangepasstes Beleuchtungsverfahren für die automatische Sichtprüfung

Robin Gruna¹ und Jürgen Beyerer²

¹ Karlsruher Institut für Technologie KIT, Lehrstuhl für Interaktive
Echtzeitsysteme IES, Adenauerring 4, D-76131 Karlsruhe

² Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung
IOSB, Fraunhoferstraße 1, D-76131 Karlsruhe

Zusammenfassung In fast allen Anwendungsbereichen der automatischen Sichtprüfung hat die Wahl der Beleuchtung für die Bildaufnahme einen entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit der nachfolgenden Bildverarbeitung und -auswertung. Viele Inspektionsaufgaben haben zum Ziel, Abweichungen von einem zuvor definierten Sollzustand zu erkennen und zu detektieren. In diesem Artikel wird ein objektangepasstes Beleuchtungsverfahren vorgestellt, das eine optische Änderungsdetektion realisiert und somit Abweichungen von einem definierten Sollzustand direkt im Inspektionsbild ohne weitere Bildverarbeitungsoperationen sichtbar macht. Ein Vergleich des Verfahrens mit herkömmlicher Differenzbildbildung zur Änderungsdetektion zeigt, dass unter plausiblen Annahmen das vorgestellte objektangepasste Beleuchtungsverfahren zu einem besseren Signal-Rauschabstand führt.

1 Einleitung

Die Auswahl einer geeigneten Beleuchtung ist einer der wichtigsten Schritte bei der Planung und dem Entwurf eines automatischen Sichtprüfsystems. Erst durch eine an die Sichtprüfaufgabe angepasste Beleuchtung wird es möglich, relevante Informationen über ein Prüfobjekt zu gewinnen und mithilfe digitaler Bildverarbeitung auszuwerten. Gerade in zeitkritischen Anwendungen können durch eine geeignete Beleuchtung Bilder gewonnen werden, für die sich so der rechentechnische Aufwand

der Bildverarbeitung und -auswertung reduzieren lässt. Beispielsweise ermöglicht eine Beleuchtung die zu einem hohen Kontrast zwischen Hintergrund und Vordergrund im Inspektionsbild führt den Einsatz einfacher und schnelle Schwellwertoperationen statt rechenaufwendiger Segmentierungsverfahren.

Während für die Auswahl der bildgebenden Optik eine Vielzahl von Entwurfsregeln existiert [1], basiert die Auswahl einer Beleuchtung meist auf Erfahrungswerten. Oft wird dabei das Ziel verfolgt eine Beleuchtung zu realisieren, die relevante Merkmale des Prüfobjekts, z. B. Defekte, hervorhebt, während Hintergrundinformationen weitestgehend unterdrückt werden. Diese Vorgehensweise wird bei einigen bekannten Beleuchtungstechniken umgesetzt, z. B. bei Dunkelfeldbeleuchtungen [2] und Beleuchtungen mit polarisiertem Licht [3]. Beispielsweise werden bei der Dunkelfeldbeleuchtung für die Inspektion technischer Oberflächen Kamera und Beleuchtung so angebracht, dass nur Oberflächendefekte die eine Abweichung von der an sonst ebenen fehlerfreien Oberfläche Licht in Richtung der Kamera streuen. Durch diese Art der Beleuchtung wird also erreicht, dass nur die für die Prüfaufgabe relevanten Abweichungen von einem vordefinierten Sollzustand als Merkmale im Inspektionsbild erscheinen, was die nachfolgende Bildauswertung im Rechner vereinfacht.

Unlängst wurden verschiedene neuartige Beleuchtungsverfahren für die automatische Sichtprüfung vorgeschlagen, die den Soll-Ist-Vergleich eines Prüfobjekts mit einem Sollzustand vereinfachen und effizienter gestalten. Dazu gehören inverse Streifenprojektionsverfahren [4] [5], deflektometrische Verfahren mit inversen Mustern [6] oder Verfahren mit kohärentem Licht, bei denen mithilfe digitaler Holografie ein objektangepasstes Wellenfeld des Sollzustand des Prüfobjekts erzeugt wird [7]. All diese Verfahren haben gemein, dass die Beleuchtung so an den Sollzustand des Prüfobjekts angepasst wird, dass während der Prüfung Abweichungen von diesem Zustand direkt im Inspektionsbild sichtbar werden und nur wenige weitere Bildverarbeitungsschritte für die Auswertung nötig sind. Die Extraktion relevanter Merkmale für den Soll-Ist-Vergleich geschieht hier also optisch während der Bildaufnahme.

In diesem Artikel wird das vorgestellte Beleuchtungsprinzip aufgegriffen und in einer neuen Beleuchtungstechnik umgesetzt, mit dem Ziel, Unterschiede zweier Szenen optisch zu detektieren und direkt im Inspektionsbild sichtbar zu machen. Dafür wird ein digitaler Videoprojektor als räumlich modulierbare Lichtquelle verwendet, der mit einer Kamera

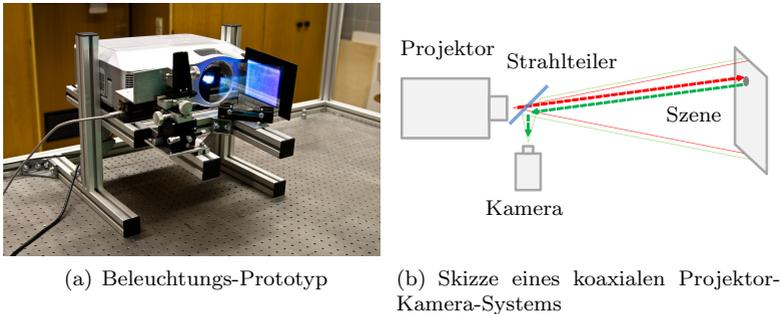


Abbildung 27.1: Aufbau eines koaxialen Projektor-Kamera-Systems.

zu einem Projektor-Kamera-System gekoppelt ist (siehe Abb. 27.1). Mit Verfahren der *fotometrischen Kompensation* [8] kann damit eine an den Sollzustand einer zu prüfenden Szene angepasste Beleuchtung erzeugt werden, die ein homogenes graues Inspektionsbild zur Folge hat. Dieses Beleuchtungsmuster wird im Weiteren als *inverses Beleuchtungsmuster* bezeichnet, da es die fotometrische Erscheinung der Szene in gewisser Weise “neutralisiert”, sodass Reflektanz und Geometrie des Sollzustandes im Inspektionsbild komplett unterdrückt sind. Wird eine vom Sollzustand abweichende Szene mit dem inversen Beleuchtungsmuster beleuchtet, treten die Abweichungen direkt im Inspektionsbild als leicht zu detektierende Merkmale auf, ohne dass weitere digitale Bildverarbeitungsschritte nötig sind. Im Folgenden wird die Anwendung dieses Beleuchtungsverfahrens für die optische Änderungsdetektion im Soll-Ist-Vergleich zweier Szenen demonstriert.

2 Erzeugung inverser Beleuchtungsmuster

Digitale Videoprojektoren sind in den letzten Jahren durch fallende Preise und Fortschritte in der Technik für viele Anwendungen aus der Computergrafik und Bildverarbeitung interessant geworden [9] [10] [5]. Videoprojektoren werden hier als programmierbare Lichtquellen eingesetzt, die eine räumliche und teilweise spektrale Modulation der Leuchtdichte ermöglichen. Zusammen mit einer Kamera in einem *Projektor-Kamera-System* können beliebig komplexe Beleuchtungsmuster auf eine

Szene projiziert und ausgewertet werden, wodurch sich vollkommen neue Möglichkeiten der Bildverarbeitung und -auswertung ergeben [11] [12].

Die Berechnung eines objektangepassten inversen Beleuchtungsmusters kann mit Verfahren der fotometrischen Kompensation gelöst werden [13] [14]. Diese behandeln das Problem, Bilder auf beliebige Hintergründe mit räumlich variierender Reflektanz und Geometrie zu projizieren, sodass ihre ursprüngliche Erscheinung erhalten bleibt. Eine Kamera tritt hierbei anstelle eines menschlichen Betrachters und liefert Informationen darüber, wie ein Bild zu modifizieren ist, um die Störeinflüsse der Reflektanz und Geometrie zu kompensieren. Um das inverse Beleuchtungsmuster einer Szene mit Verfahren der fotometrischen Kompensation zu ermitteln, wird als gewünschtes Erscheinungsbild für die Kamera ein einfarbiges Graubild angesetzt, in dem die fotometrische Erscheinung der Szene nicht mehr erkennbar ist. Das zu projizierende kompensierte Bild ist dann das gesuchte inverse Beleuchtungsmuster der Szene.

Für die fotometrische Kompensation einer Szene muss jeder für die Kamera sichtbare Szenenpunkt idealerweise separat beleuchtet werden können. Dies setzt eine präzise Korrespondenz der Kamera- und Projektoroptik voraus. Um Parallaxefehler auszuschließen, wird hier ein koaxialer Aufbau gewählt [15], wie er in Abbildung 27.1 dargestellt ist. Durch einen Strahlteiler wird das Projektionsfeld des Projektors in das Gesichtsfeld der Kamera eingespiegelt, eine Positionierungsmechanik ermöglicht dabei eine genau Justage. Werden die optischen Zentren der Kamera und des Projektors zur Deckung gebracht, entsteht eine szenenunabhängige Betrachtungs- und Projektionsgeometrie.

Um eine möglichst exakte Korrespondenz zwischen Projektorpixeln $\mathbf{x}_p = (u_p, v_p)$ und Kamerapixeln $\mathbf{x}_c = (u_c, v_c)$ zu erreichen, muss zudem eine geometrische Transformation der projizierten Bilder ausgeführt werden. Hierfür wird ein stückweise definiertes, polynomiales Transformationsmodell

$$\mathbf{x}_p = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_c, \text{ mit } \hat{\mathbf{x}}_c = (u_c^2, v_c^2, u_c v_c, u_c, v_c, 1)^T \quad (27.1)$$

angesetzt, dessen Koeffizienten $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$ mit der Methode des kleinsten Fehlerquadrates aus einer Menge bekannter Pixel-zu-Pixel-Korrespondenzen geschätzt werden. Diese werden durch die Projektion und Aufnahme binärkodierter Marker bestimmt. Die so erhaltene Transformationsvorschrift wird dann auf die zu projizierenden Bilder angewendet, mit dem Ergebnis, dass die Kamera ein unverzerrtes Bild aufnimmt,

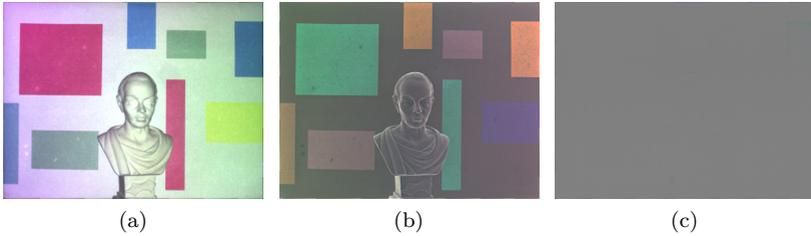


Abbildung 27.2: Ergebnisse der fotometrischen Kompensation. (a) Testszene mit homogener koaxialer Beleuchtung. (b) Inverses Beleuchtungsmuster, ermittelt mit Algorithmus (27.2) nach $t = 5$ Iterationen. (c) Aufgenommenes Kamerabild bei Beleuchtung der Szene mit inversem Beleuchtungsmuster. Die fotometrische Erscheinung der Testszene ist unterdrückt.

in dem projizierte und aufgenommene Pixel näherungsweise zur Deckung kommen.

Die Bestimmung des inversen Beleuchtungsmusters erfolgt durch ein iteratives Verfahren der fotometrische Kompensation. Dabei wird die Abweichung des aufgenommenen und gewünschten Kamerabildes ermittelt und für die iterative Anpassung des projizierten Bildes genutzt [15] [8].

Sei $g_{target}(\mathbf{x})$ das gewünschte Kamerabild und $g_{ms}^t(\mathbf{x})$ das aufgenommene Bild bei der Projektion von $g_{proj}^t(\mathbf{x})$. Zur Zeit $t = 0$ startet der Algorithmus mit der Projektion $g_{proj}^0(\mathbf{x}) := g_{target}(\mathbf{x})$. Für den Zeitpunkt $t + 1$ wird dann ein angepasstes Bild gemäß

$$g_{proj}^{t+1}(\mathbf{x}) := g_{proj}^t(\mathbf{x}) + \gamma(g_{ms}^t(\mathbf{x}) - g_{target}(\mathbf{x})) \quad (27.2)$$

bestimmt, wobei $\gamma \in (0, 1)$ einen Verstärkungsfaktor bezeichnet. Die Addition zwischen Bildern ist dabei komponentenweise für jeden Kanal separat definiert. Ist $g_{target}(\mathbf{x}) = k$ ein einfarbiges Bild mit Grauwert k , dann konvergiert der Algorithmus bereits nach wenigen Iterationen gegen einen kleinen Fehler $g_{ms}^t(\mathbf{x}) - g_{target}(\mathbf{x})$ und $g_{proj}^t(\mathbf{x})$ ergibt das gesuchte inverse Beleuchtungsmuster. Abbildung 27.2 zeigt das Ergebnis für eine Testszene nach $t = 5$ Iterationen.

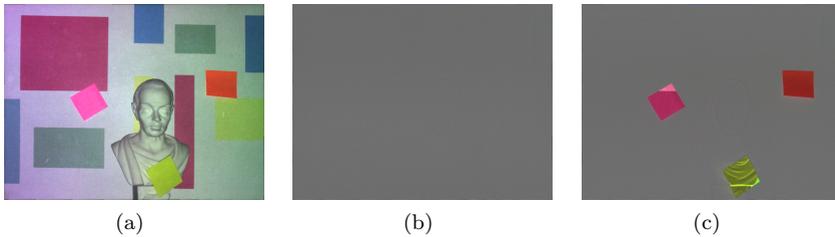


Abbildung 27.3: Anwendung des objektangepassten Beleuchtungsverfahrens für die optische Änderungsdetektion. (a) Modifizierte Testszene aus Abb. 27.2. (b) Kamerabild der unveränderten Testszene aus Abb. 27.2 bei Beleuchtung mit dem inversen Beleuchtungsmuster des Sollzustandes. (c) Beleuchtung der modifizierten Testszene mit dem inversen Beleuchtungsmuster des Sollzustandes.

3 Experimentelle Ergebnisse

Mit Hilfe von Algorithmus (27.2) wird das inverse Beleuchtungsmuster für eine Testszene generiert, das Ergebnis ist in Abb. 27.2 zusammengefasst. Abb. 27.2(a) zeigt das Kamerabild bei der Projektion des unkompensierten, einfarbigen Graubildes zur Iteration $t = 0$. Dies entspricht somit einer koaxialen Aufsichtbeleuchtung der Testszene. Abb. 27.2(b) stellt das generierte inverse Beleuchtungsmuster für $t = 5$ dar, das durch Projektion auf die Testszene ein nahezu einfarbiges Graubild ergibt, dargestellt in Abb. 27.2(c).

Um das Beleuchtungsverfahren für den Soll-Ist-Vergleich im Rahmen einer möglichen Anwendung der automatischen Sichtprüfung zu demonstrieren, wird die Testszene leicht verändert um Abweichungen der Szene von einem Sollzustand zu simulieren. Anschließend wird die modifizierte Szene mit dem inversen Beleuchtungsmuster der ursprünglichen Szene beleuchtet. Die Ergebnisse sind in Abb. 27.3 dargestellt. Wie zu sehen ist, sind die eingefügten Modifikationen der Szene leicht zu erkennen und können mit einfachen Mitteln der Bildverarbeitung, z. B. durch Schwellwertbildungen im RGB-Farbraum, detektiert werden. Die Beleuchtung durch das inverse Beleuchtungsmuster kann somit als ein Verfahren der optischen Änderungsdetektion verstanden werden.

4 Bestimmung des Signal-Rauschabstands

Offensichtlich kann ein ähnliches Ergebnis wie in Abb. 27.3 auch durch Differenzbildbildung des Sollzustandes und der zu prüfenden Szene erreicht werden. Im Folgenden werden daher beide Methoden auf signaltheoretischer Ebene bezüglich ihres Signal-Rauschabstands (engl. *signal-to-noise ratio*, *SNR*) verglichen. Dazu wird ein vereinfachtes ein-kanalige Signalmodell des Kamerabildes $g(\mathbf{x})$ in Bildkoordinaten \mathbf{x} betrachtet, das den Einfluss der Szenengeometrie vernachlässigt:

$$g(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x})e(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x}) . \quad (27.3)$$

Der Grauwert $g(\mathbf{x})$ ergibt sich hier durch das Produkt der Reflektanz $\rho(\mathbf{x})$ der Szene mit der Beleuchtungsstärke $e(\mathbf{x})$ durch den Projektor und einem additiven Rauschterm $n(\mathbf{x})$ mit Erwartungswert $E\{n(\mathbf{x})\} = 0$ und Varianz $\text{Var}\{n(\mathbf{x})\} = \sigma_n^2(\mathbf{x})$.

Als weitere nicht-additive Rauschquelle soll das im Licht inhärente Photonenrauschen modelliert werden. Dazu wird die Beleuchtungsstärke

$$e(\mathbf{x}) = \alpha \cdot \nu(\mathbf{x}) . \quad (27.4)$$

als Produkt der Anzahl der eintreffenden Photonen und einer Konvertierungskonstanten α betrachtet. Da $\nu(\mathbf{x})$ eine poissonverteilte Zufallsvariable darstellt, kann $e(\mathbf{x})$ in eine stochastische Komponente $\tilde{\nu}(\mathbf{x})$ und deterministische Komponente $\bar{\nu}(\mathbf{x})$ zerlegt werden:

$$\begin{aligned} e(\mathbf{x}) &= \alpha \underbrace{(\nu(\mathbf{x}) - E\{\nu(\mathbf{x})\})}_{=:\tilde{\nu}(\mathbf{x})} + \underbrace{E\{\nu(\mathbf{x})\}}_{=:\bar{\nu}(\mathbf{x})} \\ &= \alpha(\bar{\nu}(\mathbf{x}) + \tilde{\nu}(\mathbf{x})) , \end{aligned} \quad (27.5)$$

mit $E\{\tilde{\nu}(\mathbf{x})\} = 0$ und $\text{Var}\{\tilde{\nu}(\mathbf{x})\} = \text{Var}\{\nu(\mathbf{x})\}$. Wegen der Poissonverteilung von $\nu(\mathbf{x})$ gilt $\text{Var}\{\nu(\mathbf{x})\} = E\{\nu(\mathbf{x})\}$ und somit gleicht die Stärke des Photonenrauschens $\text{Var}\{\tilde{\nu}(\mathbf{x})\}$ der deterministischen Komponente $\bar{\nu}(\mathbf{x})$.

Mit (27.5) kann (27.3)

$$g(\mathbf{x}) = \underbrace{\alpha\rho(\mathbf{x})\bar{\nu}(\mathbf{x})}_{=:S(\mathbf{x})} + \underbrace{\alpha\rho(\mathbf{x})\tilde{\nu}(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x})}_{=:N(\mathbf{x})} \quad (27.6)$$

in das Nutzsignal $S(\mathbf{x})$ und das Rauschsignal $N(\mathbf{x})$ zerlegt werden, welches den additiven Rauschterm $n(\mathbf{x})$ und eine beleuchtungsabhängige

Komponente $\alpha\rho(\mathbf{x})\tilde{\nu}(\mathbf{x})$ umfasst. Mit diese Zerlegung kann dann der Signal-Rauschabstand als

$$\text{SNR}(\mathbf{x}) := \frac{S(\mathbf{x})^2}{\text{Var}\{N(\mathbf{x})\}} \quad (27.7)$$

definiert werden.

Für die Bestimmung des SNR für die Differenzbildbildung wird das Differenzbild $g_D(\mathbf{x}) := g''(\mathbf{x}) - g'(\mathbf{x})$ der Bilder

$$g'(\mathbf{x}) = \alpha\rho(\mathbf{x})(\bar{\nu}_D + \tilde{\nu}'_D) + n'(\mathbf{x}) \quad (27.8)$$

und

$$g''(\mathbf{x}) = \alpha \cdot (\rho(\mathbf{x}) + \Delta(\mathbf{x}))(\bar{\nu}_D + \tilde{\nu}''_D) + n''(\mathbf{x}) \quad (27.9)$$

betrachtet, die von Szenen mit um $\Delta(\mathbf{x})$ verschiedener Reflektanz und unter derselben gleichförmigen Beleuchtung aufgenommen werden (d. h. $\bar{\nu}_D$ ist konstant und unabhängig vom Ort \mathbf{x}). Nach (27.6) folgt daraus

$$\begin{aligned} g_D(\mathbf{x}) &= \underbrace{\alpha\rho(\mathbf{x})(\bar{\nu}_D - \bar{\nu}_D)}_{=0} + \underbrace{\alpha\bar{\nu}_D\Delta(\mathbf{x})}_{=:S_D(\mathbf{x})} \\ &\quad + \underbrace{\alpha\tilde{\nu}'_D(\rho(\mathbf{x}) + \Delta(\mathbf{x})) - \alpha\tilde{\nu}''_D\rho(\mathbf{x}) + n'(\mathbf{x}) + n''(\mathbf{x})}_{=:N_D(\mathbf{x})}. \end{aligned} \quad (27.10)$$

Durch Einsetzen in Definition (27.7) und Anwenden der Ersetzungen $\sigma_D^2 := \text{Var}\{\tilde{\nu}'_D\} = \text{Var}\{\tilde{\nu}''_D\}$ und $\sigma_n^2(\mathbf{x}) := \text{Var}\{n'(\mathbf{x})\} = \text{Var}\{n''(\mathbf{x})\}$ ergibt sich für den SNR des Differenzbildes

$$\begin{aligned} \text{SNR}_D(\mathbf{x}) &= \frac{\alpha^2\bar{\nu}_D^2\Delta(\mathbf{x})^2}{\alpha^2\sigma_D^2 \cdot (\rho(\mathbf{x}) + \Delta(\mathbf{x}))^2 + \alpha^2\sigma_D^2\rho(\mathbf{x})^2 + 2\sigma_n^2(\mathbf{x})} \\ &\approx \frac{\alpha^2\bar{\nu}_D^2\Delta(\mathbf{x})^2}{2\alpha^2\sigma_D^2\rho(\mathbf{x})^2 + 2\sigma_n(\mathbf{x})^2}, \end{aligned} \quad (27.11)$$

wobei für die Approximation ein kleiner Reflektanzunterschied angenommen wird, d. h. $\Delta(\mathbf{x}) \ll \rho(\mathbf{x})$.

Im Folgenden wird mithilfe des Signalmodells (27.6) der SNR für die objektangepasste Beleuchtung bestimmt. Durch das inverse Beleuchtungsmuster ergibt sich für die Kamera ein konstantes Graubild $g_I(\mathbf{x})$

mit einem festgelegten Grauwert k , d. h. $E\{g_I(\mathbf{x})\} = k$. Für die deterministische Komponente der Beleuchtungsstärke muss daher

$$\bar{\nu}_I(\mathbf{x}) = \frac{k}{\alpha\rho(\mathbf{x})} \quad (27.12)$$

gelten. Sei $\Delta(\mathbf{x})$ wieder die Reflektanzabweichung des Sollzustandes und der beobachteten Szene. Durch Einsetzen von (27.12) in das Signalmodell (27.6) folgt für das Kamerabild der zu prüfenden Szene

$$\begin{aligned} g_I(\mathbf{x}) &= \alpha \cdot (\rho(\mathbf{x}) + \Delta(\mathbf{x}))(\bar{\nu}_I(\mathbf{x}) + \tilde{\nu}_I(\mathbf{x})) + n(\mathbf{x}) \\ &= k + k \underbrace{\frac{\Delta(\mathbf{x})}{\rho(\mathbf{x})}}_{=:S_I(\mathbf{x})} + \underbrace{\alpha\tilde{\nu}_I(\mathbf{x})(\rho(\mathbf{x}) + \Delta(\mathbf{x})) + n(\mathbf{x})}_{=:N_I(\mathbf{x})} . \end{aligned} \quad (27.13)$$

Nach Definition (27.7) und durch Ersetzen von $\sigma_I^2(\mathbf{x}) := \text{Var}\{\tilde{\nu}_I(\mathbf{x})\}$ und $\sigma_n^2(\mathbf{x}) := \text{Var}\{n(\mathbf{x})\}$ ergibt sich für den SNR der objektangepassten Beleuchtung

$$\begin{aligned} \text{SNR}_I(\mathbf{x}) &= \frac{k^2\Delta(\mathbf{x})^2\rho(\mathbf{x})^{-2}}{\alpha^2\sigma_I^2(\mathbf{x})(\rho(\mathbf{x}) + \Delta(\mathbf{x}))^2 + \sigma_n^2(\mathbf{x})} \\ &\approx \frac{k^2\Delta(\mathbf{x})^2}{\alpha^2\rho(\mathbf{x})^4\sigma_I^2(\mathbf{x}) + \rho(\mathbf{x})^2\sigma_n^2(\mathbf{x})} , \end{aligned} \quad (27.14)$$

wobei für die Approximation wieder ein kleiner Reflektanzunterschied angenommen wird, d. h. $\Delta(\mathbf{x}) \ll \rho(\mathbf{x})$.

Um beide Methoden bezüglich ihres SNR zu vergleichen, wird der SNR-Gewinn (engl. *signal-to-noise ratio gain*, *SNRG*) definiert:

$$\begin{aligned} \text{SNRG}(\mathbf{x}) &:= \frac{\text{SNR}_I(\mathbf{x})}{\text{SNR}_D(\mathbf{x})} \\ &= \frac{2k^2(\alpha^2\sigma_D^2\rho(\mathbf{x})^2 + \sigma_n^2(\mathbf{x}))}{\alpha^2\bar{\nu}_D^2\rho(\mathbf{x})^2(\alpha^2\rho(\mathbf{x})^2\sigma_I^2(\mathbf{x}) + \sigma_n^2(\mathbf{x}))} . \end{aligned} \quad (27.15)$$

Die Parameter $\bar{\nu}_D$ und k sind für beide Verfahren frei wählbar und werden im Folgenden plausibel festgelegt. Eine mögliche Wahl für die konstante Beleuchtungsstärke $\bar{\nu}_D$ für die Erzeugung des Differenzbildes ist

$$\bar{\nu}_D = \frac{g_{max}}{\alpha\rho_{max}} , \quad (27.16)$$

wodurch erreicht wird, dass der höchste Reflektanzwert ρ_{max} auf den maximalen Grauwert g_{max} abgebildet wird und somit der gesamte zur Verfügung stehende Grauwertumfang für die Bildaufnahme genutzt wird. Durch gleiche Argumentation kann der Parameter k , der den Grauwert für das Kamerabild der objektangepassten Beleuchtung festlegt, auf

$$k = \frac{g_{max}}{2} \quad (27.17)$$

gesetzt werden, wodurch für die Aufnahme des unbekanntem Reflektanzunterschieds $\Delta(\mathbf{x})$ ebenfalls ein großer Grauwertumfang für die Bildaufnahme zur Verfügung steht. Durch Umformen von (27.17) nach g_{max} und einsetzen in (27.16) kann $\bar{\nu}_D$ damit durch k und ρ_{max} ausgedrückt werden:

$$\bar{\nu}_D = \frac{2k}{\alpha\rho_{max}} . \quad (27.18)$$

Um zu einer einfachen Aussage über den tatsächlichen SNR-Gewinn zu gelangen, kann (27.15) weiter vereinfacht werden indem eine dominierende Rauschquelle angenommen wird. Im Folgenden wird nun von guten Lichtbedingungen und einer großen Photonenanzahl ausgegangen, wodurch das Photonenrauschen den additiven Rauschterm dominiert. Somit ist $\sigma_D^2 \gg \sigma_n^2(\mathbf{x})$ und $\sigma_I^2(\mathbf{x}) \gg \sigma_n^2(\mathbf{x})$, und mit der Annahme $\sigma_n^2(\mathbf{x}) \rightarrow 0$ wird der additive Rauschterm vernachlässigt. Aus (27.15) folgt damit für den SNR-Gewinn unter guten Lichtbedingungen

$$\text{SNR}_{high}(\mathbf{x}) = \frac{2k^2\sigma_D^2}{\alpha^2\bar{\nu}_D^2\rho(\mathbf{x})^2\sigma_I^2(\mathbf{x})} . \quad (27.19)$$

Durch Anwenden der Tatsache dass das Photonenrauschen poissonverteilt ist, d. h. $\sigma_D^2 = \bar{\nu}_D$ und $\sigma_I^2(\mathbf{x}) = \bar{\nu}_I(\mathbf{x})$, und Ersetzt von $\bar{\nu}_D$ durch (27.18) und $\bar{\nu}_I(\mathbf{x})$ durch (27.12) kann (27.19) schließlich zu

$$\text{SNR}_{high}(\mathbf{x}) = \frac{\rho_{max}}{\rho(\mathbf{x})} \quad (27.20)$$

vereinfacht werden.

Das Ergebnis in (27.20) zeigt, dass sich der größte SNR-Gewinn durch die objektangepasste Beleuchtungstechnik in Regionen mit kleiner Reflektanz ergibt. In Regionen mit maximaler Szenenreflektanz ρ_{max} sind beide Verfahren bzgl. ihres SNRs gleich zu bewerten. Eine Herleitung des SNR-Gewinns für schlechte Lichtverhältnisse und somit kleine Photonenanzahl ist in [16] dargestellt.

5 Zusammenfassung

Es wurde ein objektangepasstes Beleuchtungsverfahren für die optische Änderungsdetektion vorgestellt. Mit Hilfe eines Projektor-Kamera-Systems kann eine zu prüfende Szene derart mit einem inversen Beleuchtungsmuster beleuchtet werden, dass die Kamera ein einfarbiges graues Inspektionsbild liefert, in dem die fotometrische Erscheinung der Szene unterdrückt ist. Ist das inverse Beleuchtungsmuster an den Sollzustand einer zu prüfenden Szene angepasst, können damit optisch Abweichungen und Änderungen der Szene direkt im Inspektionsbild sichtbar gemacht werden. Für die Bestimmung des inversen Beleuchtungsmusters wurde ein einfaches Verfahren der fotometrischen Kompensation vorgestellt, bei dem das Beleuchtungsmuster iterativ an eine Szene angepasst wird, bis die Kamera das gewünschte Inspektionsbild liefert.

Weiter wurde das vorgestellte Beleuchtungsverfahren mit herkömmlicher Differenzabbildung für die Änderungsdetektion verglichen. Für beide Verfahren wurde dafür ein einfaches SignalmodeLL aufgestellt und für den Vergleich des Signal-Rauschabstands herangezogen. Es konnte gezeigt werden, dass unter den getroffenen Annahmen das objektangepasste Beleuchtungsverfahren vorteilhafter bzgl. des Signal-Rauschabstands ist. In nachfolgenden Arbeiten sollen die gewonnenen Ergebnisse experimentell verifiziert werden.

Literatur

1. B. G. Batchelor und P. F. Whelan, *Intelligent Vision Systems for Industry*. Springer, Berlin, Feb. 1997.
2. J. E. Greivenkamp, *Field Guide to Geometrical Optics*. SPIE Society of Photo-Optical Instrumentation Engi, 2004.
3. C. Steger, M. Ulrich und C. Wiedemann, *Machine Vision Algorithms and Applications*, 1. Aufl. Wiley-Vch, Oct. 2007.
4. T. Bothe, W. Li, C. Kopylow und W. Jüptner, „Generation and evaluation of object adapted inverse patterns for projection“, *tm-Technisches Messen/Sensoren, Geräte, Systeme*, Vol. 70, Nr. 2/2003, S. 99–103, 2003.
5. Y. Cai und X. Su, „Inverse projected-fringe technique based on multi projectors“, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 45, Nr. 10, S. 1028–1034, Oct. 2007.

6. S. Werling und J. Beyerer, „Inspection of specular surfaces with inverse patterns“, *tm-Technisches Messen*, Vol. 74, Nr. 4, S. 217–223, 2007.
7. T. Baumbach, W. Osten, C. von Kopylow und W. Jüptner, „Remote metrology by comparative digital holography“, *Applied Optics*, Vol. 45, Nr. 5, S. 925–934, Feb. 2006.
8. S. K. Nayar, H. Peri, M. D. Grossberg und P. N. Belhumeur, „A projection system with radiometric compensation for screen imperfections“, in *First IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS-2003)*, 2003.
9. O. Bimber, D. Iwai, G. Wetzstein und A. Grundhöfer, „The visual computing of projector-camera systems“, *Computer Graphics Forum*, Vol. 27, Nr. 8, S. 2219–2245, 2008.
10. G. Garg, E. V. Talvala, M. Levoy und H. P. Lensch, „Symmetric photography: Exploiting data-sparseness in reflectance fields“, *Rendering Techniques*, S. 251–262, 2006.
11. Ratner und Y. Y. Schechner, „Illumination multiplexing within fundamental limits“, in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR’07*, 2007, S. 1–8.
12. T. Amano und H. Kato, „Appearance enhancement using a projector-camera feedback system“, in *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008. 19th International Conference on*, 2008, S. 1–4.
13. G. Wetzstein und O. Bimber, „Radiometric compensation through inverse light transport“, in *Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, 2007, S. 391–399.
14. M. Grossberg, H. Peri, S. Nayar und P. Belhumeur, „Making one object look like another: controlling appearance using a projector-camera system“, in *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR*, Vol. 1, 2004, S. I-452–I-459 Vol.1.
15. K. Fujii, M. Grossberg und S. Nayar, „A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments“, in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR*, Vol. 1, 2005, S. 814–821 vol. 1.
16. R. Gruna und J. Beyerer, „On scene-adapted illumination techniques for industrial inspection“, in *2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings*, Austin, TX, USA, 2010, S. 498–503.