



ENTZERRUNG VON KEGELOBERFLÄCHEN AUS EINER EINKAMERAANSICHT BASIEREND AUF PROJEKTIVER GEOMETRIE

BACHELORARBEIT
zur Erlangung des akademischen Grades
BACHELOR OF SCIENCE

Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Fachbereich Mathematik und Informatik
Institut für Informatik

Betreuung:

Dimitri Berh

Erstgutachten:

Prof. Dr. Xiaoyi Jiang

Zweitgutachten:

Prof. Dr. Klaus Hinrichs

Eingereicht von:

Lars Haalck

Münster, September 2016

Zusammenfassung

Zur Bewegungsanalyse von Kriechtieren, insbesondere der Larven der *Drosophila melanogaster*, wurde ein Untersuchungsaufbau konstruiert, sodass diese in einem, aus Glas gefertigten, Kegelstumpf mit einer Weitwinkelkamera untersucht werden können. Der Kegelstumpf ist dabei mit der Grundfläche nach oben ausgerichtet. Die Kamera nimmt aus der Vogelperspektive auf. Auf Grund der perspektivischen Verzerrung scheinen jedoch Versuchsobjekte im unteren Teil des Kegelstumpfs kleiner, als jene, die sich weiter oben befinden. Ein relativer Vergleich der Objekte ist nicht möglich.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Entzerrung solcher Kegeloberflächen, sodass die relative Vergleichbarkeit der Versuchsobjekte gewährleistet ist. Mittels RANSAC zur robusten Ellipsenschätzung und Hough-Transformation zur Liniendetektion werden dabei anhand eines Kalibrierungsmusters Korrespondenzen zwischen den Bildpunkten, sowie den Punkten des Kegels im Weltkoordinatensystem hergestellt. Anschließend wird das Bild des Kegelstumpfs mit Hilfe einer geeigneten Abbildung auf dessen Mantelfläche abgebildet. Das Ergebnis ist ein robustes Verfahren, dass auch bei starken Abweichungen der Kamera vom Lot gute Resultate liefert.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1. Kegel	3
2.1.1. Abbildung von Kegeloberfläche auf Mantelfläche	6
2.1.2. Abbildung von Mantelfläche auf Kegeloberfläche	8
2.2. Lineares Ausgleichsproblem	8
2.3. Kamerakalibrierung	10
2.4. Blob-Detektor	12
2.5. Hough-Transformation	12
2.6. RANSAC	13
2.7. Ellipsen	14
2.7.1. Definition	14
2.7.2. Abstand: Punkt zu Ellipse	18
2.8. Analytical Deformable Templates	22
3. Methodik	23
3.1. Kalibrierungsmuster	23
3.1.1. Aufbau des Kalibrierungsmusters	23
3.1.2. Anzahl der Samples	25
3.2. Intrinsische Kamerakalibrierung	25
3.3. Detektion der charakteristischen Punkte	25
3.4. Ellipsen-Detektion	26
3.4.1. RANSAC	27
3.4.2. Analytical Deformable Templates	30
3.5. Zuordnung der Punkte	31
3.6. Bestimmung der Weltkoordinaten	33
3.7. Entfaltung	33
3.7.1. Vorwärtsentfaltung	34
3.7.2. Rückwärtsentfaltung	36
4. Implementierung	37
5. Analyse	41
5.1. Vergleich Vorwärtsentfaltung und Rückwärtsentfaltung	41

INHALTSVERZEICHNIS

5.2. Einfluss der intrinsischen Kalibrierung	45
5.3. Einfluss der Rotation der Kamera	46
5.4. Laufzeit der Entfaltung	47
5.5. Evaluierung der Ellipsendetektion mittels Deformable Templates	47
5.6. Evaluierung der Ellipsendetektion mittels RANSAC	48
6. Fazit und Ausblick	53
6.1. Parallelisierung	53
6.2. Verbesserung der Linien-Detektion	53
6.3. Verbesserung der Vorwärtsentfaltung	54
6.4. Verbesserung der Rückwärtsentfaltung	54
6.5. Verbesserung der Ellipsendetektion mittels Deformable Templates	54
A. Inhalt der CD	57
Abbildungsverzeichnis	59

1. Einleitung

Drosophilae melanogaster, im Volksmund auch Fruchtfliege genannt, und ihre Larven sind schon seit Jahrzehnten ein wichtiges Untersuchungsobjekt der Biologie. Sie zeichnen sich aus durch einen schnellen Generationswechsel, eine hohe Nachkommenszahl, eine einfache Chromosomenstruktur und können darüber hinaus leicht gehalten und gezüchtet werden.

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Versuchsaufbauten zur Untersuchung des Bewegungsmusters von Drosophilae entwickelt. Als problematisch erwies sich, dass das Verhalten der Larven beim Herausnehmen aus ihren Aufzuchtröhrchen, bedingt durch den ausgesetzten Stress, negativ beeinflusst werden kann. Es wurde daher ein Aufbau entwickelt, in dem die Larven direkt in ihrem Aufzuchtröhrchen beobachtet werden konnten, wie in Abbildung 1.1(a) schematisch dargestellt. Die Larven befinden sich hierbei in einem Zylinder, der von insgesamt fünf Kameras beobachtet wird, die jeweils an einen Raspberry Pi angeschlossen sind. Die Kameras nehmen nun simultan ein Bild auf, wobei hier eine Synchronisation notwendig ist. Auf Grund der Krümmung des Zylinders, müssen diese nun entsprechend entzerrt werden. Anschließend werden die fünf entzerrten Bilder zu einem Gesamtbild zusammengefügt.

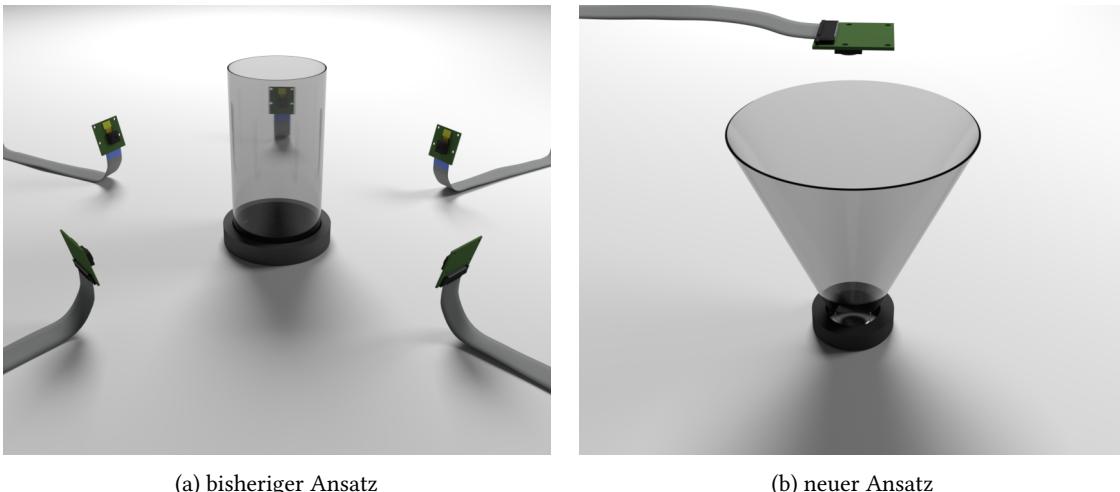


Abbildung 1.1.: beide Ansätze im Vergleich

Um ein besseres Verhältnis zwischen der Anzahl der Kameras und des Aufzuchtgeheges zu erreichen, wäre eine Reduktion der Kameraanzahl wünschenswert. Statt eines Zylinders wird in einem neuen Aufbau ein Kegel benutzt, wie in Abbildung 1.1(b) zu sehen. Das Gehege wird mit einer einzigen Weitwinkelkamera beobachtet. Eine Synchronisation, sowie ein Zusammenfügen von Einzelbildern, ist hier nicht mehr notwendig.

Wie auch bei dem bisherigen Aufbau muss auch hier eine Entzerrung durchgeführt werden. Die Larven, die sich im oberen Teil des Kegels befinden scheinen sonst größer, als jene, die sich im unteren Bereich aufhalten. Ein relativer Vergleich der Larven wäre somit nicht möglich.

In dieser Arbeit werden zwei Verfahren zum Entzerren solcher Kegeloberflächen vorgestellt, sodass die relative Vergleichbarkeit der Larven gewährleistet ist. Dazu wird die Kegeloberfläche mit Hilfe einer geeigneten Abbildung auf die Mantelfläche projiziert.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die notwendigen theoretischen Grundlagen erarbeitet. Anschließend werden beide Verfahren zur Entzerrung von Kegeloberflächen vorgestellt und ihre Funktionsweisen erläutert, woraufhin auf den implementierten Kalibrierungsassistenten eingegangen wird, der diesen Prozess vereinfachen soll. Im Anschluss werden beide Verfahren gegenüber gestellt und verschiedene Einflussfaktoren in Bezug auf die Präzision und Qualität der Entzerrung untersucht. Im letzten Kapitel wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf mögliche Verbesserungsmaßnahmen für die verwendeten Verfahren gegeben.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden einige grundlegende Begriffe und Definitionen eingeführt, die in der folgenden Arbeit benötigt werden. Zunächst wird auf die Definition eines Kegels, eines Kegelstumpfs und dessen Mantelfläche eingegangen. Anschließend wird kurz die Theorie linearer Ausgleichsprobleme erklärt, woraufhin der Prozess der Kamerakalibrierung beschrieben wird. Im Anschluss wird ein kurzer Überblick über Hough-Transformation zur Liniendetektion, sowie RANSAC zur Parameterschätzung gegeben. Es werden Ellipsen definiert und beschrieben wie die kürzeste Distanz eines Punktes zu einer Ellipse approximiert werden kann. Abschließend wird das Verfahren der Analytical Deformable Templates zur Detektion von parametrisierbaren Kurven erklärt.

2.1. Kegel

2.1.1 Definition (Kegel)

Ein Kegel ist ein geometrischer Körper, der durch eine beliebige Grundfläche, sowie einen Punkt (Spitze) definiert wird. Die Höhe H eines Kegels ist definiert als die kürzeste Distanz der Spitze zur Grundfläche. Ein Kegel mit Kreis (auch Grundkreis genannt) als Grundfläche wird als Kreiskegel bezeichnet. Wenn die Grundfläche ein Zentrum besitzt, so wird die Verbindungsgerade der Spitze mit diesem Zentrum als Achse des Kegels bezeichnet. Als gerade Kegel wird ein Kegel bezeichnet, dessen Grundfläche senkrecht zu seiner Achse steht [Jam92].

Im Folgenden werden nur gerade Kreiskegel betrachtet. Die Oberfläche eines Kegels mit Spitze $T(0, 0, 0)$, Radius R und Höhe H , dessen Zentrum des Grundkreises in $(0, H, 0)$ liegt, kann parametrisch beschrieben werden durch:

$$\begin{aligned}x &= \frac{u}{H}R \cos\theta \\y &= u \\z &= \frac{u}{H}R \sin\theta\end{aligned}\tag{2.1}$$

mit $u \in [0, H]$ und $\theta \in [0, 2\pi]$. Hierbei steht u für die aktuelle Höhe im Kegel. Um die vollständige Oberfläche zu beschreiben, muss u das Intervall $[0, H]$ abdecken. Zu jedem u ergibt sich ein Kreis mit Radius $\frac{u}{H}R$. Um einen vollständigen Kreis zu erhalten, muss θ demnach $[0, 2\pi]$ abdecken. Der Radius des Kreises nimmt zu bis er sein Maximum bei $u = H$ mit einem Wert von R erreicht.

S bezeichne die Seitenhöhe des Kegels und sei definiert durch das rechtwinklige Dreieck mit den Seitenlängen H, R und S (siehe Abbildung 2.1). Es gilt $S = \sqrt{H^2 + R^2}$.

2.1.2 Definition (Kegelstumpf und Ergänzungskegel)

Ein Kegelstumpf entsteht aus einem Schnitt eines geraden Kreiskegels mit einer zur Grundfläche parallelen Ebene (siehe Abbildung 2.2) [Jam92]. Der Kegel, der definiert ist durch die Schnittfläche und die Spitze des ursprünglichen Kegels, wird als Ergänzungskegel bezeichnet. Der geometrische Körper zwischen Grundfläche und Schnittfläche wird als Kegelstumpf bezeichnet. Die Grundfläche des Kegelstumpfs wird Grundkreis, die Schnittfläche Deckkreis genannt.

H, R, S sind dabei weiterhin die Höhe, Radius und Seitenhöhe des gesamten Kegels. Hinzu kommen h, r, s als Höhe, Radius und Seitenhöhe des Ergänzungskegels. Die Höhe, sowie die Seitenhöhe des Kegelstumpfs werden durch die Differenzen $\Delta S = S - s$, $\Delta H = H - h$ charakterisiert (siehe Abbildung 2.3).

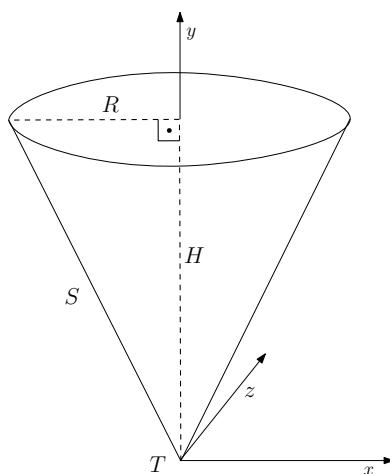


Abbildung 2.1.: gerader Kreiskegel

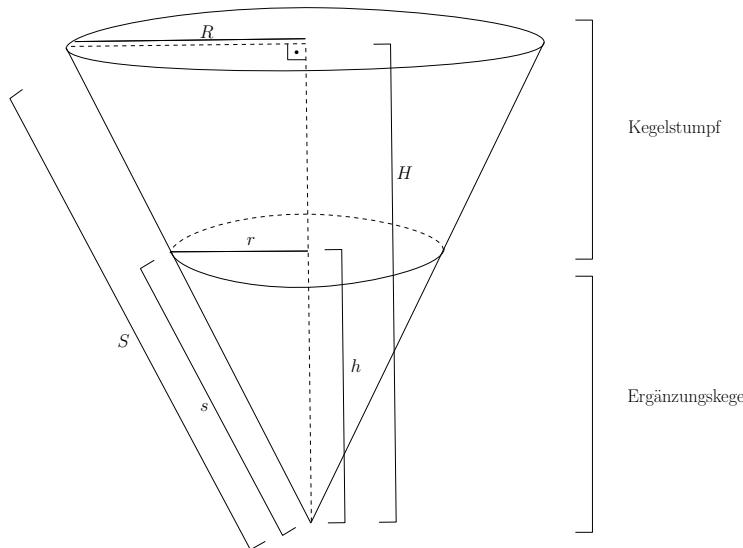


Abbildung 2.2.: Kegelstumpf und Ergänzungskegel

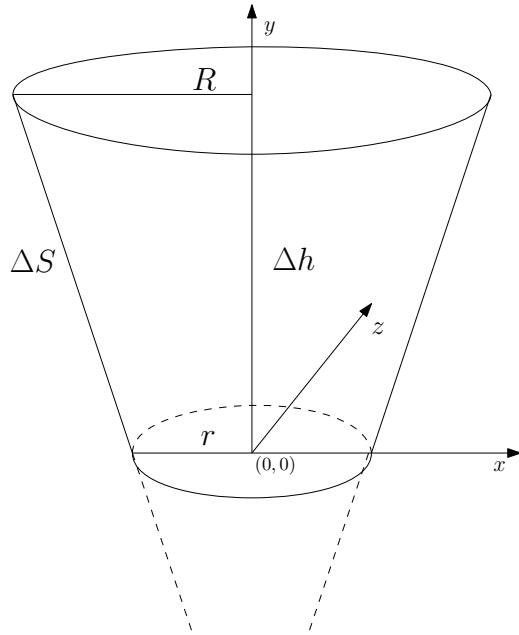


Abbildung 2.3.: Kegelstumpf

Die Oberfläche eines Kegelstumpfs mit Zentrum $(0, 0, 0)$ des Deckkreises und Zentrum $(0, \Delta H, 0)$ des Grundkreises wird analog zum klassischen Kegel durch folgende Parametrisierung definiert:

$$\begin{aligned} x &= (r + \frac{u}{\Delta H}(R - r)) \cos\theta \\ y &= u \\ z &= (r + \frac{u}{\Delta H}(R - r)) \sin\theta \end{aligned} \tag{2.2}$$

mit $u \in [0, \Delta H]$ und $\theta \in [0, 2\pi]$. Die parametrische Form eines Kegelstumpfs ist somit eine Verallgemeinerung der Parametrisierung von klassischen Kegeln (siehe Gleichung 2.1), wobei beim klassischen Kegel $r = 0$ gilt. Es wird eine Skalierung des Intervalls $[0, R]$ auf das Intervall $[r, R]$ durchgeführt, sodass ein Wert von $u = 0$ den Radius r für den Deckkreis liefert.

Die Mantelfläche des Kegelstumpfs aus Abbildung 2.4 kann in Polarkoordinaten parametrisch beschrieben werden mit

$$\begin{aligned} x &= -(s + \frac{u}{\Delta H}(S - s)) \sin\phi \\ y &= (s + \frac{u}{\Delta H}(S - s)) \cos\phi, \end{aligned} \tag{2.3}$$

wobei $u \in [0, \Delta H]$ und $\phi \in [0, \alpha] \subseteq [0, 2\pi]$. Die Seitenhöhen s und S gehören zum Ergänzungskegel, respektive zum ganzen Kegel.

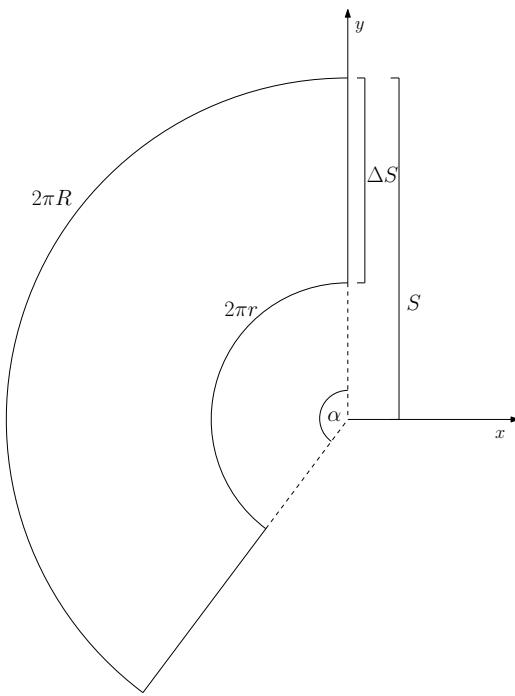


Abbildung 2.4.: Kegelmantelfläche

Die Mantelfläche ergibt sich durch Entrollen des Kegelstumpfs. Da der Umfang des Kreises mit Radius R , $2\pi R$ beträgt, muss, wie in Abbildung 2.4 zu sehen, der äußere Kreisbogen die Bogenlänge $2\pi R$ haben. Analog beträgt die Bogenlänge des inneren Kreisbogens $2\pi r$. Für den Winkel α muss demnach gelten $\alpha S = 2\pi R$, also $\alpha = 2\pi \frac{R}{S}$. Da sich die Seitenhöhe linear zur Höhe des Kegelstumpfs verhält, kann die Seitenhöhe durch die Höhe ausgedrückt werden. Hierbei gilt $(s + \frac{u}{\Delta H}(S - s))$. Bei Höhe $u = 0$ ergibt sich somit, wie erwartet, die Seitenhöhe s , bei Höhe $u = \Delta H$ die Seitenhöhe S .

Ein Punkt auf der Oberfläche des Kegelstumpfs kann eindeutig einem Punkt auf der Mantelfläche (und umgekehrt) zugeordnet werden. Dazu wird im Folgenden eine Abbildung und ihr Inverses konstruiert.

2.1.1. Abbildung von Kegeloberfläche auf Mantelfläche

Sei dazu ein Punkt $C(x, y, z)$ auf der Oberfläche des Kegelstumpfs gegeben. Gegeben durch die parametrischen Gleichung 2.2, hat C die Form

$$C(x, y, z) = \left(\left(r + \frac{u}{\Delta H}(R - r) \right) \cos \theta, u, \left(r + \frac{u}{\Delta H}(R - r) \right) \sin \theta \right)$$

für ein $u \in [0, \Delta H]$ und $\theta \in [0, 2\pi]$.

Aus der y -Koordinate lässt sich direkt die Höhe u ablesen und somit analog zur Gleichung 2.3 die zugehörige Seitenhöhe bestimmen. Diese entspricht dem Radius der Polarkoordinaten in der parametrischen Gleichung

der Mantelfläche. Es wird hierfür eine Hilfsfunktion definiert:

$$T(y) := s + \frac{y}{\Delta H}(S - s). \quad (2.4)$$

Da $R, r, \Delta H$ und nun auch die Höhe bekannt sind, kann der Winkel θ im Kegelstumpf ausgerechnet werden. Anschließend muss dieser noch mit $\frac{R}{S}$ multipliziert werden, um ihn auf $[0, \alpha]$ zu skalieren (siehe Gleichung 2.3). In Gleichung 2.2 wird nach $\cos \phi$, beziehungsweise nach $\sin \phi$ umgestellt und anschließend nach ϕ aufgelöst. Zunächst werden beide Gleichungen durch $(r + \frac{y}{\Delta H}(R - r))$ geteilt. Zu beachten ist nun, dass hier nicht die Umkehrfunktionen acos oder asin benutzt werden können, da \sin und \cos in einer Periode $[0, 2\pi)$ nicht injektiv sind. Die Wertebereiche der Umkehrfunktionen sind also eingeschränkt. Im Allgemeinen liefern sie nicht den erwünschten Winkel aus $[0, 2\pi)$. Das gleiche Problem zeigt sich bei $\tan \phi = \frac{\sin \phi}{\cos \phi}$ und der Umkehrfunktion atan . Um dieses Problem zu beheben, wird eine Fallunterscheidung gemacht und es ergibt sich wie folgt die sogenannte atan2 -Funktion

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \text{atan} \frac{y}{x} & \text{für } x > 0 \\ \text{atan} \frac{y}{x} + \frac{\pi}{2} & \text{für } x < 0, y \geq 0 \\ \text{atan} \frac{y}{x} - \frac{\pi}{2} & \text{für } x < 0, y < 0 \\ \text{atan} + \frac{\pi}{2} & \text{für } x = 0, y > 0 \\ \text{atan} - \frac{\pi}{2} & \text{für } x = 0, y < 0 \\ 0 & \text{für } x = 0, y = 0. \end{cases}$$

Mit der Funktion wird untersucht in welchem Quadranten sich der Punkt (x, y) befindet und entsprechend behandelt. Sie gibt den Winkel ϕ im Intervall $(-\pi, \pi]$ zurück. Um den Winkel in $[0, 2\pi)$ zu bestimmen, muss anschließend mod 2π gerechnet werden.

Aus diesen Erkenntnissen wird wieder eine Hilfsfunktion definiert

$$\Phi(x, y, z) := \frac{R}{S} \left[\left(\text{atan2} \left(\frac{z}{r + \frac{y}{\Delta H}(R - r)}, \frac{x}{r + \frac{y}{\Delta H}(R - r)} \right) \right) \bmod 2\pi \right], \quad (2.5)$$

die den korrekten Winkel der Polarkoordinaten liefert und auf das Intervall $[0, \alpha)$ skaliert.

Mit den beiden Hilfsfunktionen 2.4 und 2.5, sowie der Gleichung 2.3 ergibt sich insgesamt

$$\begin{aligned} \Psi: [r, R] \times [0, \Delta H] \times [r, R] &\rightarrow [s, S] \times [s, S] \\ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &\mapsto \begin{pmatrix} -T(y) \sin \Phi(x, y, z) \\ T(y) \cos \Phi(x, y, z) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.1.2. Abbildung von Mantelfläche auf Kegeloberfläche

Analog lässt sich die Umkehrabbildung konstruieren. Sei ein Punkt $L(x, y)$ auf der Mantelfläche des Kegelstumpfs gegeben. Aus der parametrischen Form der Mantelfläche (Gleichung 2.3) ergibt sich

$$L(x, y) = \left(-\left(s + \frac{u}{\Delta H} (S - s) \right) \sin \phi, \left(s + \frac{u}{\Delta H} (S - s) \right) \cos \phi \right)$$

für ein passendes $u \in [0, \Delta H]$ und $\phi \in [0, \alpha] \subseteq [0, 2\pi]$.

Da $L(x, y)$ in Polarkoordinaten gegeben ist, kann der Radius durch $\sqrt{x^2 + y^2}$ bestimmt werden. Der Winkel ϕ mit inverser Skalierung $\frac{S}{R}$ kann analog zur Gleichung 2.5 durch folgende Hilfsfunktion bestimmt werden:

$$\Theta(x, y) := \frac{S}{R} \left[\left(\text{atan2} \left(-\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \right) \bmod 2\pi \right]. \quad (2.7)$$

Die Höhe des Kegels und somit auch der Radius lassen sich nun als Umkehrabbildung zur Hilfsfunktion 2.4 bestimmen:

$$H(x, y) := \frac{\left(\sqrt{x^2 + y^2} \right) - s}{S - s} \Delta H \quad (2.8)$$

Insgesamt ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Psi^{-1} : [s, S] \times [s, S] &\rightarrow [r, R] \times [0, \Delta H] \times [r, R] \\ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &\mapsto \begin{pmatrix} \left(r + \frac{H(x, y)}{\Delta H} (R - r) \right) \cos(\Theta(x, y)) \\ H(x, y) \\ \left(r + \frac{H(x, y)}{\Delta H} (R - r) \right) \sin(\Theta(x, y)) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.9)$$

2.2. Lineares Ausgleichsproblem

Gegeben seien m Messdaten $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$, sowie eine lineare Funktion

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n c_i \varphi_i(x)$$

in x mit Skalaren $c_1, \dots, c_n \in \mathbb{R}$, Funktionen $\varphi_1, \dots, \varphi_n$, $n \leq m$ und $n, m \in \mathbb{N}$.

Gesucht ist eine Lösung, welche die mittlere Abweichung

$$\Delta_2 = \min_{c_1, \dots, c_n \in \mathbb{R}} \left(\sum_{j=1}^m (y_j - \varphi(x_j))^2 \right) = \min_{c_1, \dots, c_n \in \mathbb{R}} \left(\sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n y_j - (c_i \varphi_i(x_j)) \right)^2 \right)$$

minimiert [Sto07].

Dieses Problem wird als lineares Ausgleichsproblem oder als Methode der kleinsten Quadrate bezeichnet und lässt sich wie folgt formulieren:

$$\min_{c \in \mathbb{R}^n} \|y - Ac\|_2$$

mit

$$\begin{aligned} c &= (c_1, \dots, c_n)^T \in \mathbb{R}^n \\ x &= (x_1, \dots, x_m)^T \in \mathbb{R}^m \\ y &= (y_1, \dots, y_m)^T \in \mathbb{R}^m \\ A &= (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad \text{mit} \quad a_{ij} = \varphi_i(x_j) \end{aligned}$$

Das Problem lässt sich auch mit Hilfe der äquivalenten Normalengleichung

$$(A^T A)c = A^T y$$

lösen, wobei mindestens eine Lösung existiert und bei mehreren Lösungen, die Lösung mit kleinster 2-Norm ausgewählt wird.

Gilt darüber hinaus $\text{rang}(A) = n$ so ist $A^T A$ invertierbar und es gilt:

$$c = \underbrace{(A^T A)^{-1} A^T}_{{A}^+} y. \quad (2.10)$$

Dabei ist c die eindeutige Lösung mit kleinsten 2-Norm. A^+ bezeichnet man auch als Moore-Penrose Inverse oder einfach als Pseudoinverse von A . Im Allgemeinen ist die Matrix $A^T A$ nicht invertierbar. Die Pseudoinverse kann somit nicht einfach mit $(A^T A)^{-1} A^T$ berechnet werden. Stattdessen lässt sie sich durch eine Singulärwertzerlegung (SVD) bestimmen [Sto11]. Die Matrizen $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ und $A^+ \in \mathbb{R}^{n \times m}$ können geschrieben werden als:

$$\begin{aligned} A &= U \Sigma V^T \\ A^+ &= V \Sigma^+ U^T \end{aligned}$$

mit orthogonalen Matrizen $U \in \mathbb{R}^{m \times m}$ und $V \in \mathbb{R}^{n \times n}$ und einer Diagonalmatrix $\Sigma \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Die Diagonale der Matrix Σ besteht aus den absteigend sortierten Singulärwerten von A , die Matrix $\Sigma^+ \in \mathbb{R}^{n \times m}$ aus den jeweiligen reziproken Singulärwerten. Bei beiden Matrizen wird die Diagonale mit Nullen aufgefüllt.

Die Lösung des Ausgleichsproblems kann dann mittels SVD angeben werden als:

$$c = (V \Sigma^+ U^T) y$$

Zu beachten ist, dass dieses Vorgehen auch bei Matrizen A mit $\text{rang}(A) = n$ funktioniert, also wenn $A^T A$ invertierbar ist. Außerdem lässt es sich numerisch stabil implementieren [Sto11].

2.3. Kamerakalibrierung

Um die Parameter einer Kamera korrekt beschreiben zu können, ist ein Kameramodell notwendig. Das wohl bekannteste Kameramodell ist das Lochkamera-Modell. Die Lichtstrahlen der Szene gelangen dabei durch eine kleine Öffnung in die Kamera (siehe dazu Abbildung 2.5).

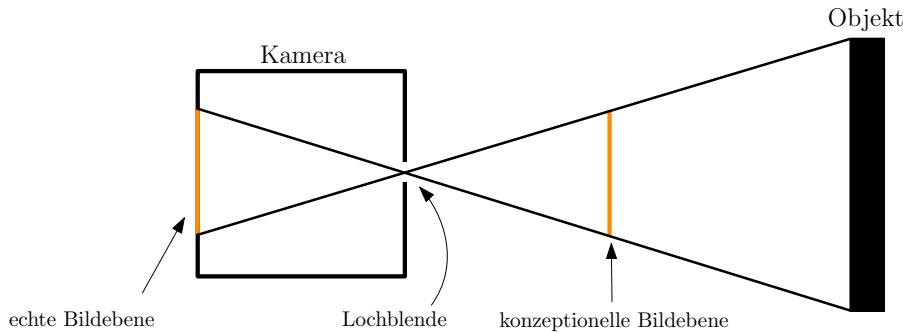


Abbildung 2.5.: Lochkameramodell

Das Bild, das an der Rückseite der Kamera entsteht, ist dabei um 180° gedreht. Damit man diese Rotation nicht betrachten muss, kann man die Bildebene virtuell vor die Lochblende setzen. Da sich der Abstand zur Blende nicht ändert, ändern sich auch die optischen Eigenschaften des Bildes nicht.

Eine Kamerakalibrierung wird benötigt, um eine Beziehung zwischen Punkten im dreidimensionalen Weltkoordinatensystem und den Punkten auf der zweidimensionalen Bildebene herstellen zu können. Konkret wird eine projektive Abbildung

$$\begin{pmatrix} wu \\ wv \\ w \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{pmatrix}}_{=:A} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

gesucht, die einen Punkt $P = (x, y, z)$ in homogenen Koordinaten $\tilde{P} = (x, y, z, 1)$ auf einen Punkt $\tilde{C} = (wu, wv, w)$ beziehungsweise nach der perspektivischen Division $C = (u, v)$ auf die Bildebene abbildet, wobei die a_{ij} von den intrinsischen und extrinsischen Parametern der Kamera abhängen [HS97].

Als intrinsische Parameter einer Kamera werden die optischen Eigenschaften, sowie die interne Kamerageometrie bezeichnet. Hierzu zählen beispielsweise Linsenverzerrungen, sowie die Brennweite. Extrinsische Parameter beschreiben die dreidimensionale Position und Orientierung der Bildebene relativ zu einem Weltkoordinatensystem [Tsa87].

Die Matrix A kann mit gegebenen Punktkorrespondenzen bestimmt werden. Dafür werden Punkte (x_k, y_k, z_k) für $k = 1, \dots, m$ im Weltkoordinatensystem und die korrespondierenden Punkte (u_k, v_k) auf der Bildebene benötigt. Zunächst wird das Gleichungssystems 2.11 nach u und v umgestellt:

$$u_k = \frac{a_{11}x_k + a_{12}y_k + a_{13}z_k + a_{14}}{a_{31}x_k + a_{32}y_k + a_{33}z_k + a_{34}}$$

$$v_k = \frac{a_{21}x_k + a_{22}y_k + a_{23}z_k + a_{24}}{a_{31}x_k + a_{32}y_k + a_{33}z_k + a_{34}}.$$

Die Matrixeinträge a_{ij} werden als Unbekannte betrachtet und das Gleichungssystem kann noch einmal umformuliert werden zu:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & z_m & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_mx_m & -u_my_m & -u_mz_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_m & y_m & z_m & 1 & -v_mx_m & -v_my_m & -v_mz_m \end{pmatrix}}_{=:M} = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{14} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{24} \\ a_{31} \\ a_{32} \\ a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_m \\ v_m \end{pmatrix}, \quad (2.12)$$

wobei a_{34} auf eins skaliert werden darf, da in homogenen Koordinaten gerechnet wird. Es handelt sich hierbei für $m \geq 6$ um ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem, was mittels der Methode der kleinsten Quadrate (siehe Kapitel 2.2) und durch eine Singulärwertzerlegung gelöst werden kann. Dieses Verfahren wird auch als Direct Linear Transformation (DLT) bezeichnet.

Das beschriebene Verfahren vernachlässigt dabei Linsenverzerrungen. Solche Verzerrungen entstehen entweder als Produktionsfehler günstiger Linsen, oder werden durch spezielle Linsen, wie bei Weitwinkelkameras, begünstigt. Verzerrungen können in der Regel nicht linear modelliert werden. Der Ansatz über DLT funktioniert hier dementsprechend nicht.

Es wird grundsätzlich zwischen zwei Typen von Verzerrungen unterschieden: radiale Verzerrung und tangentiale Verzerrung. Radiale Verzerrung entsteht durch eine Skalierung des Abstands eines Bildpunktes zum Fokus. Wird der Abstand vergrößert, spricht man von einer tonnenförmigen Verzerrung (siehe Abbildung 2.6(b)), wird er verkleinert von einer kissenförmigen Verzerrung (siehe Abbildung 2.6(c)).

Radiale Verzerrung kann wie folgt modelliert werden:

$$\hat{x}^{(r)} = x \left[1 + k_1 (x^2 + y^2) + k_2 (x^2 + y^2)^2 \right]$$

$$\hat{y}^{(r)} = y \left[1 + k_1 (x^2 + y^2) + k_2 (x^2 + y^2)^2 \right],$$

wobei (x, y) ein verzerrter Bildpunkt, $(\hat{x}^{(r)}, \hat{y}^{(r)})$ der entzerrte Punkt und k_1 und k_2 die Koeffizienten der radialen Verzerrung sind [Zha00].

Tangentiale Verzerrung ist auf eine fehlerhafte Fertigung zurückzuführen und entsteht beispielsweise, wenn

sich eine Linse nicht parallel zur Bildebene befindet. Sie kann modelliert werden durch:

$$\begin{aligned}\hat{x}^{(t)} &= [2p_1xy + p_2((x^2 + y^2) + 2x^2)] \\ \hat{y}^{(t)} &= [p_1((x^2 + y^2) + 2y^2) + 2p_2xy],\end{aligned}$$

wobei (x, y) wieder ein verzerrter Bildpunkt, $(\hat{x}^{(t)}, \hat{y}^{(t)})$ der entzerrte Punkt und p_1 und p_2 die Koeffizienten der tangentialen Verzerrung sind [HS97].

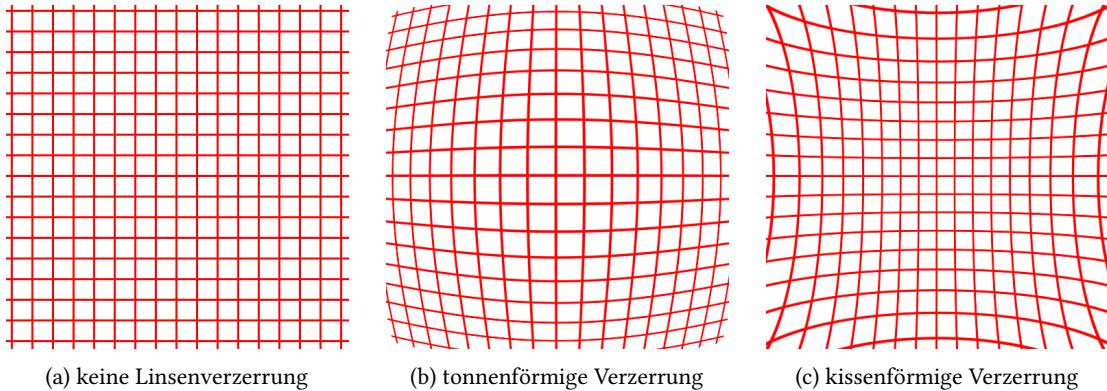


Abbildung 2.6.: Linsenverzerrungen

2.4. Blob-Detektor

2.4.1 Definition (Blob)

Ein Blob ist eine glatte zusammenhängende Region in einem Bild, die sich farblich von ihrer Umgebung abhebt [Lin93].

Ein Blob-Detektor ist ein Verfahren zum Detektieren solcher Blobs. Die gefundenen Blobs können anschließend unter anderem nach folgenden Kriterien gefiltert werden:

- **Fläche** beschreibt die Größe eines Blobs
- **Rundheit** beschreibt die Ähnlichkeit zu einem Kreis und ist definiert durch $circ = \frac{4\pi \cdot \text{Fläche}}{(\text{Umfang})^2} \in [0, 1]$, wobei ein Kreis mit $circ = 1$ maximal rund ist.
- **Konvexität** beschreibt die Ähnlichkeit eines Blobs zu seiner konvexen Hülle. Konvexität ist definiert als $conv = \frac{\text{Fläche Blob}}{\text{Fläche konvexe Hülle}} \in [0, 1]$

2.5. Hough-Transformation

Die Hough-Transformation ist ein Verfahren zur Detektion von beliebigen parametrisierbaren Konturen. In dieser Arbeit wird Hough-Transformation benutzt, um Geraden zu detektieren.

Eine beliebige zweidimensionale Gerade kann in Polarkoordinaten folgendermaßen implizit ausgedrückt werden:

$$x \cos \phi + y \sin \phi = d, \quad (2.13)$$

wobei $\phi \in [0, 2\pi)$ der Winkel der Geraden mit der x -Achse und $d \geq 0$ der Radius, also der euklidische Abstand der Geraden zum Ursprung des Koordinatensystems, ist.

Eine Gerade wird somit als ein Punkt (d, ϕ) in den Parameterraum (auch Hough-Raum) abgebildet.

Um eine Gerade eindeutig zu definieren benötigt man, wie auch bei der klassischen Definition $y = mx + b$, zwei Punkte. Beschränkt man sich auf einen Punkt, so lässt sich jedoch die Auswahl von ϕ und d einschränken. Hat man beispielsweise einen Punkt (x_k, y_k) gegeben, so ergibt die Gleichung 2.13 eine sinusförmige Funktion in Abhängigkeit von ϕ .

Um nun beliebige Geraden detektieren zu können, werden ϕ und d zunächst passend diskretisiert:

$$\begin{aligned} \phi_i &= \phi_{min} + \frac{i}{n} \cdot (\phi_{max} - \phi_{min}) \quad \forall i \in [0, n] \\ d_j &= d_{min} + \frac{j}{m} \cdot (d_{max} - d_{min}) \quad \forall j \in [0, m] \end{aligned}$$

Es wird nun ein Akkumulator $\mathcal{H}(\phi, d)$ für alle ϕ_i und d_j auf null gesetzt. Als Nächstes wird ein Kantentbild mittels Canny [Can86] erzeugt. Die Kantenpixel werden mit (x_k, y_k) für $k = 0, \dots, l$ identifiziert. Das eigentliche Verfahren funktioniert nach folgendem Schema:

Algorithmus 1 Hough-Transformation

```

1: for  $k = 0$  to  $l$  do // für alle Kantenpunkte
2:   for  $i = 0$  to  $n$  do // für alle diskreten Winkel  $\phi_i$ 
3:      $d \leftarrow x_k \cos \phi_i + y_k \sin \phi_i$ 
4:      $d_i \leftarrow \text{round}(d)$  // runde  $d$  zum nächsten diskreten  $d_i$ 
5:      $\mathcal{H}(\phi_i, d_i) \leftarrow \mathcal{H}(\phi_i, d_i) + 1$ 
6:   end for
7: end for

```

Die Werte im Akkumulator werden oft auch als Votes bezeichnet. Am Ende des Verfahrens wird im Akkumulator nach Häufungspunkten gesucht. Jeder Häufungspunkt steht dort für einen Geradenkandidaten.

2.6. RANSAC

Random Sample Consensus (RANSAC) [FB81] ist ein nicht-deterministisches robustes Verfahren zur Parameterschätzung eines Modells bei einer, möglicherweise durch starke Ausreißer gestörten Messreihe. Im Gegensatz zu Verfahren, wie der Methode der kleinsten Quadrate, die versuchen eine optimale Lösung für alle Messdaten zu bestimmen, wird bei RANSAC nur eine Teilmenge der Messreihe genutzt.

Aus der Menge der Messdaten wird wiederholt zufällig die minimale Anzahl Messdaten ausgewählt, die nötig ist, um das Modell eindeutig zu beschreiben und es wird dann geprüft, wie gut das geschätzte Modell die restlichen Messdaten beschreibt. Die Güte des Modells wird im Allgemeinen durch ein Distanzmaß, wie zum Beispiel der euklidische Abstand, berechnet. Hat ein Messdatum eine vorher definierte Maximaldistanz zum geschätzten Modell nicht überschritten, wird es ins sogenannte Consensus Set des Modells aufgenommen. Das Modell mit dem größten Consensus Set wird schließlich ausgewählt.

Die Anzahl der Punkte, die notwendig sind, um das Modell eindeutig zu beschreiben sei durch $k \in \mathbb{N}$ gegeben. Der relative Ausreißeranteil wird mit $\epsilon \in [0, 1)$ bezeichnet. Die Anzahl der Iterationen, die mindestens notwendig sind, um mit einer Wahrscheinlichkeit von $p \in [0, 1)$, bei einem relativen Ausreißeranteil von ϵ und k Punkten mindestens einmal eine ausreißerfreie Teilmenge der Messreihe zu erhalten, lässt sich dann nach [FB81] berechnen als:

$$n_{min} = \frac{\log(1-p)}{\log\left(1-(1-\epsilon)^k\right)}. \quad (2.14)$$

2.7. Ellipsen

2.7.1. Definition

2.7.1 Definition (Ellipse)

Eine Ellipse wird beschrieben durch diejenigen Punkte, deren Summe der Abstände zu zwei gegebenen Punkten f_1 und f_2 (Brennpunkte) konstant sind. Der Mittelpunkt der Verbindungsgeraden der beiden Brennpunkte wird als Zentrum der Ellipse bezeichnet (siehe Abbildung 2.7). Als Hauptachse a wird die Länge der Verbindungsgeraden vom Zentrum bis zu einem der Scheitelpunkte (V_1 beziehungsweise V_3) der Ellipse bezeichnet. Die Länge der zu ihr rechtwinkligen Verbindungsgeraden durch den Zentrum bis zu einem der anderen Scheitelpunkte (V_2 beziehungsweise V_4) wird Nebenachse b genannt.

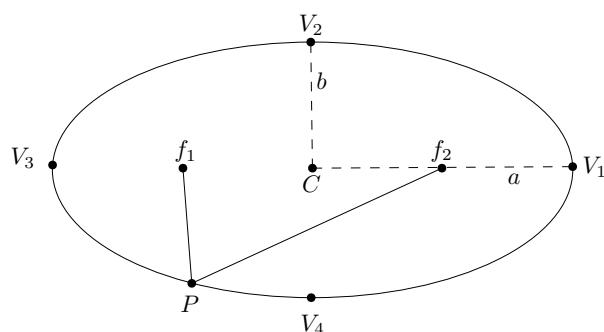


Abbildung 2.7.: Ellipse mit Brennpunkten f_1/f_2 , Zentrum C , Hauptachse a , Nebenachse b und Scheitelpunkten V_1/V_3 und V_2/V_4

In ihrer einfachsten Form liegt die Ellipse im Zentrum des Koordinatensystems und ihre Haupt- und Nebenachse a und b sind achsenausgerichtet. Das heißt ihre Hauptachse liegt auf der x -Achse und ihre

Nebenachse auf der y -Achse. Sie kann dann in der impliziten Form

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2.15)$$

beschrieben werden.

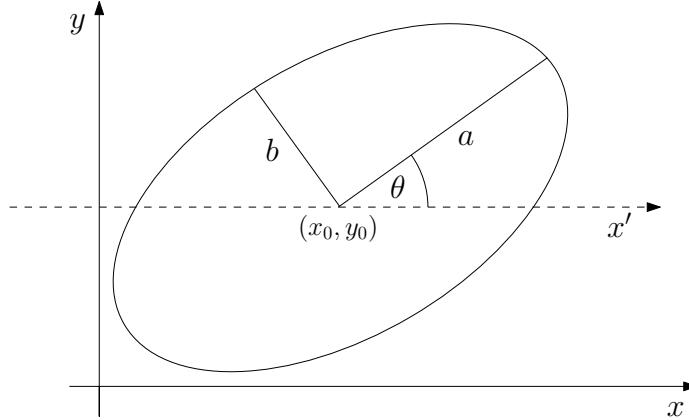


Abbildung 2.8.: Ellipse mit Zentrum (x_0, y_0) , Hauptachse a , Nebenachse b , sowie Drehwinkel θ

Befindet sich die Ellipse nicht im Ursprung, so muss eine Verschiebung, beziehungsweise bei einer Rotation ein Drehwinkel (siehe Abbildung 2.8), ergänzt werden. Es gilt

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (2.16)$$

für eine nicht rotierte Ellipse, beziehungsweise

$$\frac{((x - x_0) \cos \theta + (y - y_0) \sin \theta)^2}{a^2} + \frac{((x - x_0) \sin \theta - (y - y_0) \cos \theta)^2}{b^2} = 1 \quad (2.17)$$

für eine rotierte Ellipse mit Zentrum $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$, Hauptachsen $a, b \in \mathbb{R}^+$, sowie gegebenenfalls einem Drehwinkel $\theta \in [0, 2\pi)$ oder parametrisiert

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 + a \cos \phi \cos \theta - b \sin \phi \sin \theta \\ y_0 + a \cos \phi \sin \theta + b \sin \phi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

mit $\phi \in [0, 2\pi)$ und x_0, y_0, a, b, θ wie oben.

In ihrer allgemeinsten Form lässt sich eine Ellipse durch ein implizites Polynom zweiten Grades charakterisieren. Es gilt:

$$ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f = 0 \quad \text{mit} \quad c^2 - 4ab < 0, \quad (2.19)$$

wobei $a, b, c, d, e, f \in \mathbb{R}$. Eine Ellipse lässt sich demnach durch sechs Punkte eindeutig beschreiben (fünf, wenn man f auf eins skaliert).

Die beiden Formen 2.17 und 2.19 sind äquivalent, falls die Ellipse nicht zu einem Punkt oder einer Linie

degeneriert ist [Law72]. Dies ist dann der Fall, wenn $a = b = 0$ (Punkt), oder $a = 0 \vee b = 0$ (Linie) gilt. Die Umformung von 2.17 nach 2.19 ist mit Hilfe einer Hauptachsentransformation möglich. Da diese später benötigt wird, wird sie hier exemplarisch vorgeführt.

Zunächst einmal fällt auf, dass der gemischte Term cxy genau dann null ist, wenn die Ellipse nicht rotiert wurde. Im ersten Schritt wird also die Rotation der Ellipse rückgängig gemacht, um den Rotationswinkel bestimmen zu können.

Die Gleichung 2.19 kann umgeformt werden zu:

$$\begin{aligned} ax^2 + \frac{c}{2}xy + \frac{c}{2}yx + by^2 + dx + ey + f &= 0 \\ \Leftrightarrow (ax + \frac{c}{2}y) &\left(\begin{array}{c} x \\ y \end{array} \right) + dx + ey + f = 0 \\ \Leftrightarrow \underbrace{\begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix}}_{=:u^T} &\underbrace{\begin{pmatrix} a & \frac{c}{2} \\ \frac{c}{2} & b \end{pmatrix}}_{=:M} \underbrace{\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}}_{=:u} + \underbrace{\begin{pmatrix} d & e \end{pmatrix}}_{=:u^T} \underbrace{\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}}_{=:u} + f &= 0 \\ \Leftrightarrow u^T Mu + \begin{pmatrix} d & e \end{pmatrix} u + f &= 0 \end{aligned}$$

Der gemischte Term wird alleine durch $M = \begin{pmatrix} a & \frac{c}{2} \\ \frac{c}{2} & b \end{pmatrix}$ bestimmt. Die Matrix M ist invertierbar, denn

$$\det M = ab - \frac{c^2}{4}$$

ist nur dann gleich null, wenn $c^2 - 4ab = 0$, was ein Widerspruch zur Annahme in Gleichung 2.19 ist. M hat somit eine von null verschiedene Determinante und somit vollen Rang, hat also zwei von null verschiedene Eigenwerte [Bos06]. Insbesondere gibt es zwei Eigenvektoren von M , die zueinander orthogonal sind, da Eigenvektoren zu verschiedenen Eigenwerten orthogonal zueinander sind.[Bos06].

Da die Matrix M außerdem symmetrisch ist, ist sie orthogonal diagonalisierbar [Bos06].

Es gilt $M = S^T DS$, wobei $S \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ eine orthogonale Matrix mit den normierten Eigenvektoren als Zeilen und $D = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ eine Diagonalmatrix mit den beiden Eigenwerten von M auf der Diagonalen ist. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit gelte $\lambda_1 \leq \lambda_2$, andernfalls werden die Eigenvektoren in S vertauscht.

Sei nun $v := Su$. So gilt:

$$\begin{aligned} u^T (S^T DS) u + \begin{pmatrix} d & e \end{pmatrix} \underbrace{(S^T S)}_{=:1} u + f &= 0 \\ \Leftrightarrow (Su)^T D(Su) + \begin{pmatrix} d & e \end{pmatrix} S^T (Su) + f &= 0 \\ \Leftrightarrow v^T Dv + \begin{pmatrix} d & e \end{pmatrix} S^T v + f &= 0 \\ \Leftrightarrow \lambda_1 v_1^2 + \lambda_2 v_2^2 + \begin{pmatrix} d & e \end{pmatrix} S^T v + f &= 0 \end{aligned} \tag{2.20}$$

mit $v = (v_1, v_2)^T$. Man sieht, dass der gemischte Teil somit eliminiert wurde. Durch Anwenden der Transformation S wurde u in das Koordinatensystem, in dem die Ellipse achsenausgerichtet ist, transformiert.

Eine Rotationsmatrix mit Rotationswinkel θ ist definiert durch:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Es gilt offenbar $S = R$ für ein geeignetes θ , da die Eigenvektoren normiert und orthogonal zueinander sind. Mit der Funktion atan2 kann θ einfach ausgerechnet werden, denn es gilt:

$$\theta = \text{atan2}(\sin \theta, \cos \theta) = \text{atan2}(S_{2,1}, S_{1,1})$$

Formt man nun Gleichung 2.20 weiter um, ergibt sich:

$$\begin{aligned} & \lambda_1 v_1^2 + \lambda_2 v_2^2 + \underbrace{\begin{pmatrix} d & e \end{pmatrix} S^T v + f}_ {=: (d', e')} = 0 \\ \Leftrightarrow & \lambda_1 v_1^2 + \lambda_2 v_2^2 + d' v_1 + e' v_2 + f = 0 \\ \Leftrightarrow & (\lambda_1 v_1^2 + d' v_1) + (\lambda_2 v_2^2 + e' v_2) + f = 0 \\ \Leftrightarrow & (\lambda_1 v_1^2 + d' v_1) + \left(\frac{d'^2}{4\lambda_1} - \frac{d'^2}{4\lambda_1} \right) + (\lambda_2 v_2^2 + e' v_2) + \left(\frac{e'^2}{4\lambda_2} - \frac{e'^2}{4\lambda_2} \right) + f = 0 \quad (2.22) \\ \Leftrightarrow & \left[\lambda_1 \left(v_1^2 + \frac{2d'}{2\lambda_1} v_1 + \frac{d'^2}{4\lambda_1^2} \right) - \frac{d'^2}{4\lambda_1} \right] + \left[\lambda_2 \left(v_2^2 + \frac{2e'}{2\lambda_2} v_2 + \frac{e'^2}{4\lambda_2^2} \right) - \frac{e'^2}{4\lambda_2} \right] + f = 0 \\ \Leftrightarrow & \lambda_1 \underbrace{(v_1 + \frac{d'}{2\lambda_1})^2}_{=-x'_0} + \lambda_2 \underbrace{(v_2 + \frac{e'}{2\lambda_2})^2}_{=-y'_0} - \underbrace{\left(\frac{d'^2}{4\lambda_1} + \frac{e'^2}{4\lambda_2} - f \right)}_{=:\sigma} = 0, \end{aligned}$$

da $\lambda_1, \lambda_2 \neq 0$.

Das Zentrum der transformierten Ellipse (x'_0, y'_0) kann nun aus Gleichung 2.22 abgelesen werden. Um das Zentrum der eigentlichen Ellipse zu bestimmen, muss mit der inversen Rotation S^T multipliziert werden:

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = S^T \begin{pmatrix} x'_0 \\ y'_0 \end{pmatrix}.$$

Die Gleichung 2.22 lässt sich anschließend weiter vereinfachen:

$$\begin{aligned} & \lambda_1 (v_1 - x'_0)^2 + \lambda_2 (v_2 - y'_0)^2 = \sigma \\ \Leftrightarrow & \frac{\lambda_1}{\sigma} (v_1 - x'_0)^2 + \frac{\lambda_2}{\sigma} (v_2 - y'_0)^2 = 1 \quad (2.23) \end{aligned}$$

wobei $\sigma \neq 0$, wenn die Ellipse nicht zum Punkt entartet ist (folgt aus dem Determinantenkriterium [Law72]).

Aus dem Vergleich der beiden Gleichungen 2.23, sowie 2.16 kann folgende Beziehung hergestellt werden:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_1}{\sigma} &= \frac{1}{a^2} \quad \text{und} \quad \frac{\lambda_2}{\sigma} = \frac{1}{b^2} \\ \Leftrightarrow \sqrt{\frac{\sigma}{\lambda_1}} &= a \quad \text{und} \quad \sqrt{\frac{\sigma}{\lambda_2}} = b \end{aligned} \tag{2.24}$$

Das Ergebnis für die beiden Achsen ist reell, da $\frac{\sigma}{\lambda_i} > 0$ für nicht entartete reelle¹ Ellipsen gilt (folgt aus dem Determinantenkriterium [Law72]). Da die Transformation in das Koordinatensystem der Ellipse nur Rotationen enthält, bleiben die Längen der Hauptachsen erhalten. Es gilt wie erwartet $a \geq b$, da $\lambda_1 \leq \lambda_2$.

2.7.2. Abstand: Punkt zu Ellipse

Das hier beschriebene Verfahren zur Bestimmung der kürzesten euklidischen Distanz eines Punktes zu einer Ellipse stammt aus der Arbeit von David Eberly [Ebe13]. Es werden hierbei nur Ellipsen im Ursprung betrachtet, die achsenausgerichtet sind und darüber hinaus nur Punkte im ersten Quadranten. Ansonsten wird die Ellipse in den Ursprung verschoben und um ihren entgegengesetzten Drehwinkel rotiert. Der untersuchte Punkt wird anschließend analog zur Ellipse transformiert. Da die Ellipse dann bezüglich der x - und y -Achse symmetrisch ist, kann der Punkt einfach durch Spiegelung in den richtigen Quadranten verschoben werden. Der Abstand zur Ellipse ändert sich dadurch nicht.

Sei $Q = (x_1, y_1)$ ein Punkt, dessen Distanz zur Ellipse berechnet werden soll und $E = (x_0, y_0)$ derjenige eindeutige Punkt, welcher auf der Ellipse liegt und die kürzeste euklidische Distanz zum Punkt Q hat.

Aufgrund dieser Forderungen können ohne Beschränkung der Allgemeinheit folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Ellipse kann stets durch die implizite Gleichung

$$\frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{b^2} = 1 \tag{2.25}$$

mit $a \geq b \geq 0$ beziehungsweise in der parametrischen Form

$$\mathcal{E}(\phi) = (a \cos \phi, b \sin \phi) \quad \text{mit} \quad \phi \in [0, 2\pi)$$

beschrieben werden.

- Es gilt $x_0, y_0, x_1, y_1 \geq 0$.

Für die quadratische Distanz von einem beliebigen Punkt Q zu einem Punkt $\mathcal{E}(\phi)$ auf der Ellipse gilt dann

$$F(\phi) = (\mathcal{E}(\phi) - Q)^2. \tag{2.26}$$

¹Man kann Ellipsen auch mit imaginären Achsen definieren [Law72].

Die Funktion F soll bezüglich ϕ minimiert werden. Dazu muss ihre Ableitung betrachtet werden:

$$F'(\phi) = 2(\mathcal{E}(\phi) - Q) \cdot \mathcal{E}'(\phi). \quad (2.27)$$

F' wird null, wenn $(\mathcal{E}(\phi) - Q)$ und $\mathcal{E}'(\phi)$ zu einander orthogonal sind. Daraus folgt, dass der Vektor von $Q(x_1, y_1)$ zu $E(x_0, y_0)$ senkrecht zur Ellipse stehen muss (siehe Abbildung 2.9).

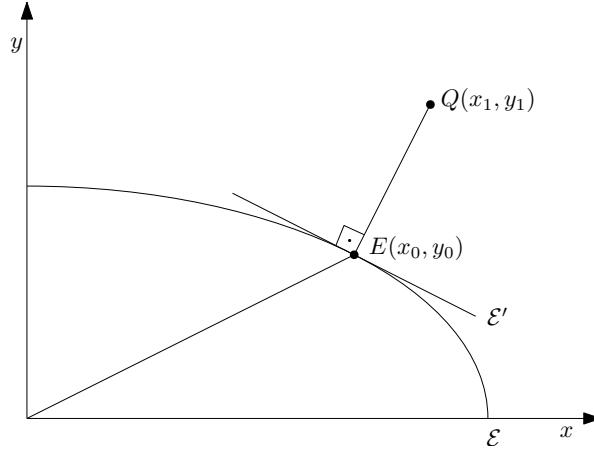


Abbildung 2.9.: Ellipsenausschnitt im ersten Quadranten mit Abfragepunkt Q und eingezeichneter kürzester Distanz zum Ellipsenpunkt E . Die Ellipse wird beschrieben durch \mathcal{E}

Die Nullstellen der Funktion

$$G(x, y) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1, \quad (2.28)$$

basierend auf der impliziten Darstellung aus Gleichung 2.25, beschreiben eine Ellipse. Sei nun solch eine Nullstelle gegeben durch (x_0, y_0) . Der Gradient ∇G ist dann in (x_0, y_0) ein Normalenvektor der Ellipse. Somit ist auch der halbe Gradient² $\nabla G(x_0, y_0)/2$ ein Normalenvektor. Da aus Gleichung 2.27 die Orthogonalität von \vec{QE} zur Ellipse folgt, muss der Vektor \vec{QE} ein skalares Vielfaches des halben Gradienten sein. Es gilt somit:

$$(x_1, y_1) - (x_0, y_0) = t \frac{\nabla G(x_0, y_0)}{2} = t \left(\frac{x_0}{a^2}, \frac{y_0}{b^2} \right) \quad (2.29)$$

für ein $t \in \mathbb{R}$.

Umgestellt nach x_1 und y_1 , beziehungsweise nach x_0 und y_0 , ergeben sich folgende Gleichungen:

$$x_1 = x_0 \left(1 + \frac{t}{a^2} \right), \quad y_1 = y_0 \left(1 + \frac{t}{b^2} \right) \quad (2.30)$$

$$x_0 = \frac{a^2 x_1}{t + a^2}, \quad y_0 = \frac{b^2 y_1}{t + b^2} \quad (2.31)$$

²nutzt man den halben Gradienten kürzen sich das 1/2 und die 2 aus den partiellen Ableitungen der Ellipse heraus

Man macht nun eine Fallunterscheidung:

1. Der einfachste Fall ist, wenn sich der Punkt Q auf der y -Achse (außer $(0, 0)$) befindet, wenn also gilt $x_1 = 0, y_1 > 0$. Da die Hauptachse nach der x -Achse ausgerichtet ist und $a \geq b$ gilt, ist der Punkt auf der Ellipse mit der kürzesten Distanz zu Q offenbar $E = (0, b)$ und für die Distanz gilt $d = |y_1 - b|$.
2. Als nächstes befindet sich Q auf der x -Achse (einschließlich $(0, 0)$), wenn also gilt $x_1 \geq 0, y_1 = 0$. Es gilt mit 2.30

$$x_1 = x_0 \left(1 + \frac{t}{a^2}\right), \quad 0 = y_0 \left(1 + \frac{t}{b^2}\right) \quad (2.32)$$

Wenn $y_0 = 0$ gilt, muss $x_0 = a$ gelten, damit $E(x_0, y_0)$ auf der Ellipse ist. Es gilt analog zum ersten Fall $E = (a, 0)$ mit $d = |x_1 - a|$

Gilt $y_0 \neq 0$, so kann in der zweiten Gleichung aus Gleichung 2.32 durch y_0 geteilt werden und es folgt $t = -b^2$ und somit $x_1 = x_0 \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)$. Der Punkt $E(x_0, y_0)$ liegt außerdem oberhalb von $(a, 0)$ und es gilt deshalb auf Grund der Krümmung der Ellipse $x_0 < a$.

Insgesamt ergibt sich mit Gleichung 2.31 die Ungleichung

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{a^2 x_1}{a^2 - b^2} < a \\ \Leftrightarrow x_1 &< \frac{a^2 - b^2}{a}. \end{aligned}$$

Das bedeutet, dass sich der Punkt $Q(x_1, y_1)$ in der Ellipse befindet.

Für Punkte $Q(x_1, 0)$ mit $x_1 \geq \frac{a^2 - b^2}{a}$ muss dementsprechend $y_0 = 0$ gelten und der kürzeste Punkt ist wieder $E(a, 0)$.

Für Punkte $Q(x_1, 0)$ mit $x_1 < \frac{a^2 - b^2}{a}$ muss für $E(x_0, y_0)$, nach Umstellen der Ellipsengleichung 2.25, $y_0 = b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{a}\right)^2}$ gelten. Die quadratische Distanz von $E(x_0, y_0)$ zu $Q(x_1, 0)$ beträgt dann:

$$d^2 = (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - 0)^2.$$

Setzt man nun $y_0 = b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{a}\right)^2}$ ein und für jedes Vorkommen von x_0 die Gleichung $x_0 = \frac{a^2 x_1}{a^2 - b^2}$ ein,

so ergibt sich insgesamt:

$$\begin{aligned}
d^2 &= (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - 0)^2 \\
&= \left(x_1 \frac{a^2}{a^2 - b^2} - x_1 \right)^2 + b^2 \left(1 - x_1^2 \frac{a^2}{(a^2 - b^2)} \right) \\
&= x_1^2 \left(\frac{a^2}{a^2 - b^2} - 1 \right)^2 - b^2 x_1^2 \frac{a^2}{(a^2 - b^2)^2} + b^2 \\
&= x_1^2 \left[\frac{a^4}{(a^2 - b^2)^2} - 2 \frac{a^2}{a^2 - b^2} + 1 - \frac{b^2 a^2}{(a^2 - b^2)^2} \right] + b^2 \\
&= x_1^2 \left[\frac{a^4 - 2a^2(a^2 - b^2) + (a^2 - b^2)^2 - b^2 a^2}{(a^2 - b^2)^2} \right] + b^2 \\
&= x_1^2 \left[\frac{a^4 - 2a^4 + 2a^2 b^2 + a^4 - 2a^2 b^2 + b^4 - b^2 a^2}{(a^2 - b^2)^2} \right] + b^2 \\
&= x_1^2 \left[\frac{b^4 - b^2 a^2}{(a^2 - b^2)^2} \right] + b^2 = x_1^2 \left[\frac{-b^2 (a^2 - b^2)}{(a^2 - b^2)^2} \right] + b^2 \\
&= -b^2 \frac{x_1^2}{a^2 - b^2} + b^2 = b^2 \left(1 - \frac{x_1^2}{a^2 - b^2} \right).
\end{aligned}$$

3. Der letzte Fall ist der allgemeinste Fall. Es gilt $x_1 > 0$, sowie $y_1 > 0$. Da sich laut Voraussetzung alle Punkte im ersten Quadranten befinden, gilt darüber hinaus $x_0, y_0 \geq 0$. Mit diesen Eigenschaften und Gleichung 2.30 lässt sich folgende Einschränkung für t herleiten:

$$\begin{aligned}
0 < x_1 &= x_0 \left(1 + \frac{t}{a^2} \right) \\
\Leftrightarrow 0 &< 1 + \frac{t}{a^2} \\
\Leftrightarrow -1 \cdot a^2 &< t.
\end{aligned}$$

Analog ergibt sich mit y_1 : $-b^2 < t$. Da $a \geq b$ gilt, reicht es nur die zweite Ungleichung zu betrachten, da sie die erste impliziert. Setzt man nun Gleichung 2.31 in Gleichung 2.28 ein, erhält man:

$$\begin{aligned}
F(t) &= \left(\frac{a^2 x_1}{a(t+a^2)} \right)^2 + \left(\frac{b^2 y_1}{b(t+b^2)} \right)^2 - 1 \\
&= \left(\frac{ax_1}{t+a^2} \right)^2 + \left(\frac{by_1}{t+b^2} \right)^2 - 1
\end{aligned}$$

Durch Untersuchung der Ableitungen kann nun gezeigt werden, dass diese Funktion auf dem gesamten Intervall $[-b^2, \infty)$ monoton fällt und links gekrümmmt ist [Ebe13]. Darüber hinaus gilt:

$$\lim_{t \searrow -b^2} F(t) = +\infty, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = -1.$$

Da F stetig ist, muss es eine Nullstelle geben, die aufgrund des Monotonie- und Krümmungsverhaltens sogar eindeutig ist. Die Nullstelle lässt sich beispielsweise durch Intervallschachtelung oder dem

Newton-Verfahren bestimmen.

2.8. Analytical Deformable Templates

Analytical Deformable Templates ist ein Verfahren zur Detektion von analytischen Kurven. Ein Template ist dabei definiert durch eine Menge von Parametern, die a-priori Wissen über die erwartete Form ermöglichen. Als Beispiel sei eine Ellipse genannt, die durch ihr Zentrum, ihren beiden Achsen und den Drehwinkel, also (x_0, y_0, a, b, θ) definiert ist. Es wird dann eine Energiefunktion konstruiert, deren Terme eine Anziehung des Templates an Hauptmerkmale (wie Kantenstärke, Kantenorientierung, Farbintensität, etc.) des Bildes hervorrufen. Die Energiefunktion wird dabei durch numerische Verfahren, wie dem Gradientenverfahren, minimiert [YHC92].

3. Methodik

In diesem Kapitel werden zwei Verfahren zur Entzerrung von Kegeloberflächen vorgestellt. Zunächst wird auf das verwendete Kalibrierungsmuster eingegangen, woraufhin die einzelnen Schritte der Entzerrung erläutert werden.

Die geometrischen Eigenschaften des Kegelstumpfs ($r, R, \Delta H$) können gemessen und somit als bekannt angenommen werden. Darüber hinaus wird angenommen, dass sich das Zentrum des Deckkreises an der Position $(0, 0, 0)$, sowie das Zentrum des Grundkreises an der Position $(0, \Delta H, 0)$ im Weltkoordinatensystem befindet (siehe Abbildung 2.3 in Kapitel 2.1). Durch diese Einschränkung gehen jegliche absolute Größenverhältnisse verloren. Die Larven können jedoch weiterhin relativ zu einander verglichen werden.

3.1. Kalibrierungsmuster

Um eine Beziehung zwischen Bildpunkten und Kegelpunkten herstellen zu können, ist ein Kalibrierungsmuster notwendig.

Die Wahl des Kalibrierungsmusters spielt eine entscheidende Rolle bei der Robustheit und Präzision der Entfaltung. Es muss gewährleistet sein, dass die charakteristischen Merkmale des Musters auch bei leichten Abweichungen der Kamera vom Lot und schlechteren Beleuchtungssituationen zuverlässig erkannt werden. Das Muster muss darüber hinaus so entworfen sein, dass beim Zusammenlegen im Kegel dessen geometrische Eigenschaften nicht verfälscht, sondern realitätsgtreu wiedergeben werden.

3.1.1. Aufbau des Kalibrierungsmusters

Die Wahl fiel auf ein Muster, dass in äquidistanten Abständen ΔR , beginnend mit dem Radius r des Deckkreises (siehe Abbildung 2.3) Kreislinien und in gleichen Winkelabständen $\Delta\alpha$ auf der Seitenhöhe Liniensegmente besitzt. Das zusammengelegte Muster ist in Abbildung 3.1 skizziert, beziehungsweise das entfaltete in Abbildung 3.2. Die Anzahl der Kreislinien wird mit n gekennzeichnet, die Anzahl sichtbarer Liniensegmente im Kegel mit m . Zu beachten ist, dass bedingt durch das Entfalten, in Abbildung 3.2 ein Liniensegment doppelt zu sehen ist. Die schwarzen Kreise werden als Samples bezeichnet.

Durch die bekannte Geometrie des Kegels, kann jedem Sample ein Punkt auf dem Kegel im Weltkoordinatensystem zugeordnet werden. Da ein Kegel beliebig um die y -Achse rotiert werden kann, ist diese Zuordnung zunächst nicht eindeutig. Dazu sei angenommen, dass das Liniensegment mit dem kleinsten Winkel zur x -Achse mit dem Kegelwinkel $\theta = 0$ korrespondiert (siehe Gleichung 2.2 in Kapitel 2.1).

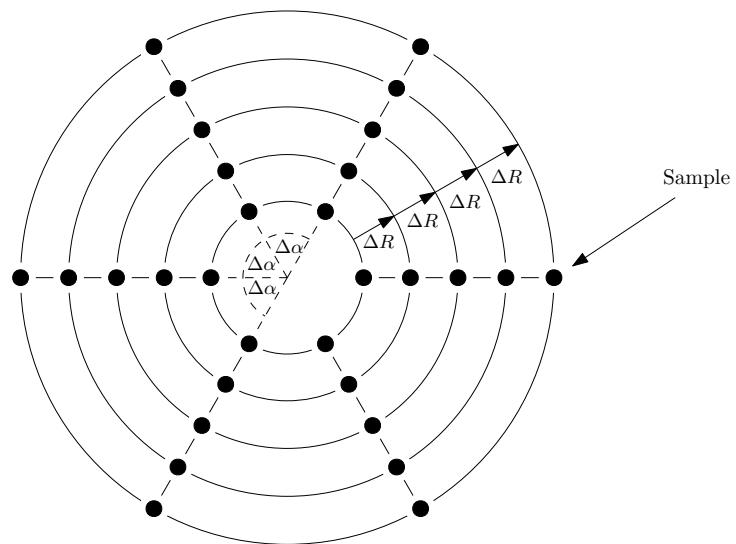


Abbildung 3.1.: Kalibrierungsmuster von oben mit $n = 5, m = 6$

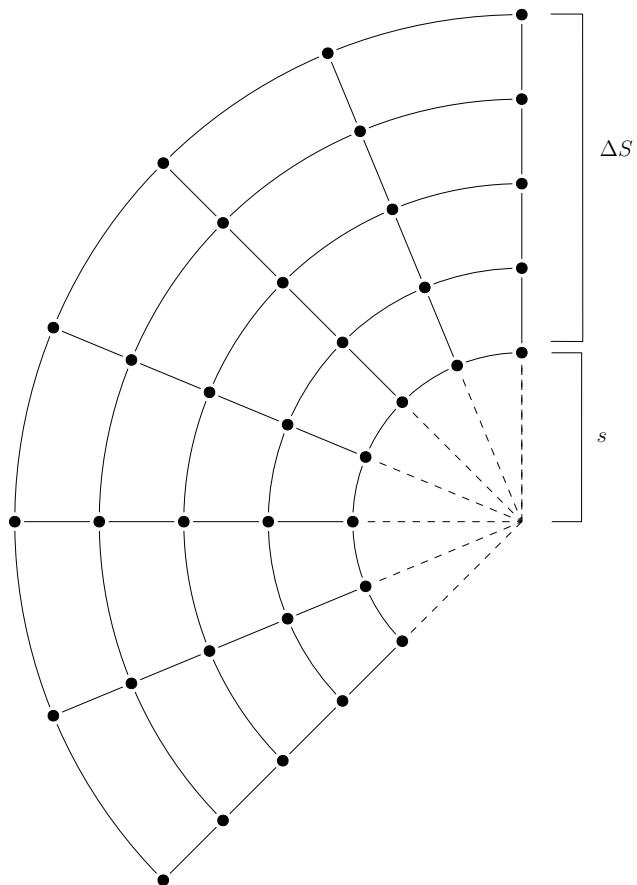


Abbildung 3.2.: Kalibrierungsmuster entfaltet mit $n = 5, m = 6$

Zur Konstruktion des Musters benötigt man ΔS und s , die man aus der Geometrie des Kegels errechnen kann und außerdem den Öffnungswinkel, der gegeben ist als $\alpha = 2\pi \frac{R}{S}$ (siehe Gleichung 2.3 in Kapitel 2.1).

3.1.2. Anzahl der Samples

Die Anzahl der Samples sollte groß genug sein, um möglichst viele geometrische Informationen des Kegels zu erhalten, aber klein genug, dass eine Detektion der Samples problemlos möglich ist. Insbesondere auf dem innersten Kreis macht sich eine zu hohe Sampleanzahl negativ bemerkbar, da der Abstand der Samples zueinander sehr klein wird, was eine Detektion erschwert. Des Weiteren sollte noch ein möglichst großer Teil der Kreislinien zu sehen bleiben, da diese für die spätere Ellipsendetektion benötigt werden.

3.2. Intrinsische Kamerakalibrierung

Bedingt durch die Wahl einer Weitwinkelkamera, sind die Bilder von einer starken tonnenförmigen (nach außen gewölbte) Verzerrung geprägt, wie in Abbildung 3.3 zu sehen. Diese muss herausgerechnet werden, da sonst Abstände im Bild nicht mehr der Realität entsprechen und dadurch die Präzision der Entfaltung stark abnimmt (siehe Kapitel 5). Es wird im ersten Schritt eine Kamerakalibrierung durchgeführt.

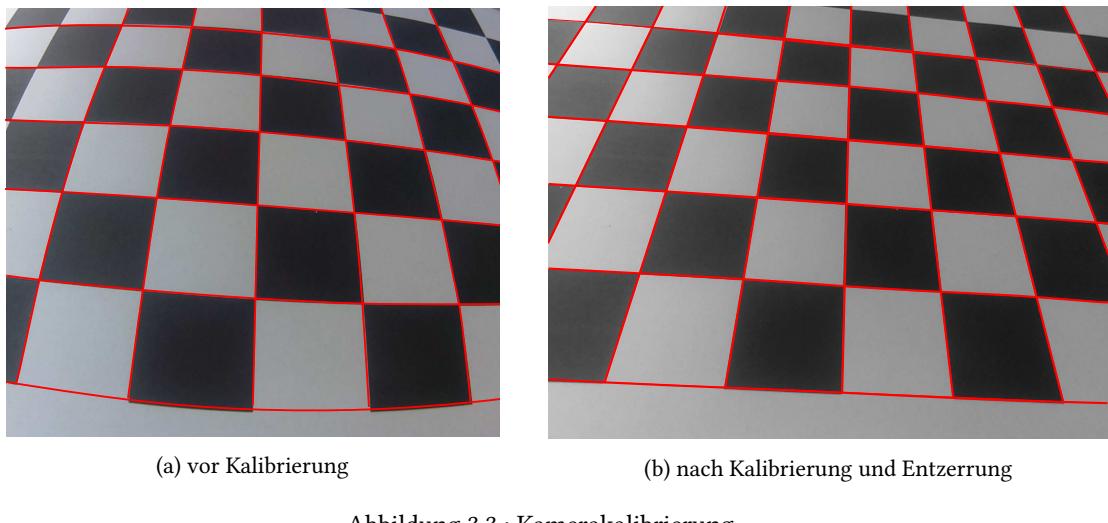


Abbildung 3.3.: Kamerakalibrierung

3.3. Detektion der charakteristischen Punkte

Nach der Kamerakalibrierung und entsprechender Entzerrung werden die Bildkoordinaten der Samples bestimmt. Dazu wird ein Blob-Detektor (siehe Kapitel 2.4) benutzt. Um ein Sample korrekt detektieren zu können, muss sich der Punkt farblich stark von seiner Umgebung abheben (siehe Definition eines Blobs 2.4.1). Das bedeutet, dass ein Sample freigestellt (helle homogene Umgebung) sein muss. Insbesondere dürfen

die Kreislinien und Liniensegmente des Kalibrierungsmusters demnach ein Sample nicht berühren, wie es in Abbildung 3.4 am Beispiel eines einzelnen Samples zu sehen ist.

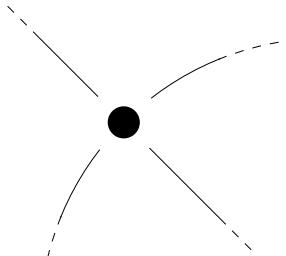


Abbildung 3.4.: Kreislinien und Liniensegmente berühren das Sample nicht.

Nach der Detektion werden die Blobs nach Fläche, Rundheit, sowie Konvexität mittels experimentell ermittelter Werte gefiltert. Konkret werden zu kleine (Fläche Blob < 50), zu unrunde ($circ < 0.4$) und zu unkonvexe ($conv < 0.75$) Blobs verworfen.

In Abbildung 3.5 ist beispielhaft links ein Grauwertbild und rechts die detektierten Blobs (rot) auf dem gleichen Bild nach der Kameraentzerrung zu sehen.

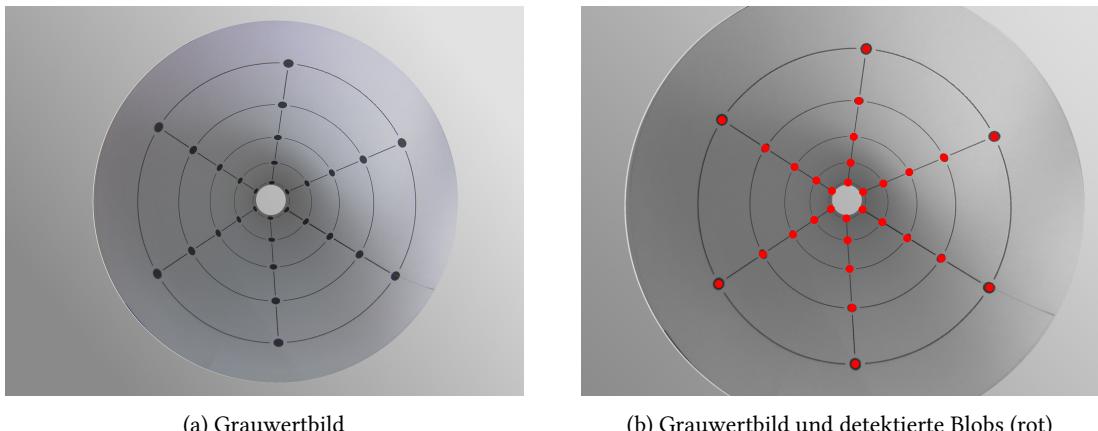


Abbildung 3.5.: detektierte Samples

3.4. Ellipsen-Detektion

Nachdem die Sample-Positionen bestimmt wurden, muss für jedes Sample entschieden werden, auf welcher der Kreislinien es liegt. Da die Kreise, bedingt durch perspektivische Verzerrung, zu Ellipsen werden, wird ein Verfahren benötigt, dass Ellipsen erkennt. Dies kann mit Hilfe von zwei verschiedenen Verfahren realisiert werden. Zunächst wird ein Ansatz zur Parameterschätzung der Ellipsen mittels RANSAC erläutert, woraufhin auf einen Ansatz eingegangen wird, bei dem die Ellipsen iterativ mit Hilfe von Deformable Templates detektiert werden.

3.4.1. RANSAC

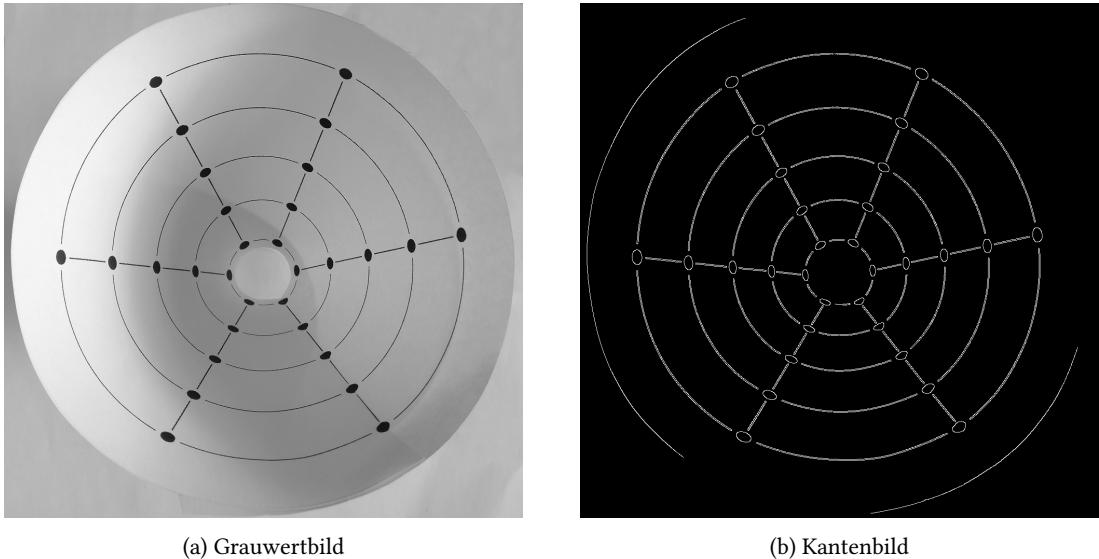


Abbildung 3.6.: Canny-Kantendetektion

Zunächst werden die Kanten mit Hilfe des Canny-Kantendetektors [Can86] erfasst (siehe Abbildung 3.6). Anschließend wird eine möglichst genau Schätzung des Zentrum der innersten Ellipse vorgenommen. Dafür wird eine Hough-Transformation (siehe Kapitel 2.5) benutzt, um Linien im Kantenbild zu detektieren. Es werden anschließend die Schnittpunkte aller Liniensegmente bestimmt. Die Liniensegmente schneiden sich dabei genau dann in einem Punkt, wenn sich die Kamera genau im Lot befindet und perfekt auf das Zentrum des Deckkreises ausgerichtet ist. Darüber hinaus werden, auf Grund der Liniendicke auf dem Kalibrierungsmuster, durch den Canny-Algorithmus viele Linien als doppelte Linien gekennzeichnet¹. Auch ein inhomogener Hintergrund erschwert die Ermittlung eines Mittelpunkts. Befinden sich Objekte im Hintergrund, werden durch die Kantendetektion auch deren Kanten ermittelt. Die Hough-Transformation detektiert auch außerhalb des Kalibrierungsmusters Linien. Die Schnittpunkte mit solchen Linien können beliebig stark von dem eigentlichen Mittelpunkt abweichen. Würde man an dieser Stelle beispielsweise den Mittelwert aller Schnittpunkte (elementweise) berechnen, könnten solche Ausreißer die Lokalisierung des Mittelpunkts erheblich verschlechtern.

Um möglichst robust einen Kandidaten auszuwählen, wird der Median der x -Koordinaten der Schnittpunkte und der Median der y -Koordinaten bestimmt. Die erhaltenen Koordinaten bilden den Schnittpunkt, wie in Abbildung 3.7 beispielhaft zu sehen.

Von diesem Schnittpunkt aus werden, in einer vorher definierten Anzahl, gleichmäßig Strahlen in alle Richtungen Strahlen ausgesendet. Trifft ein Strahl ein Kantenpixel, wird dessen Position gekennzeichnet, trifft er den Rand des Bildes, wird er ignoriert. In Abbildung 3.8(a) sind beispielhaft die getroffenen Kantenpixel (weiß) und der zugehörige Aussendepunkt eingezeichnet.

¹Stellt man sich ein relativ breites Liniensegment vor, so gibt es einmal den Übergang vom Hintergrund auf die Linie, sowie den Übergang von der Linie wieder auf den Hintergrund

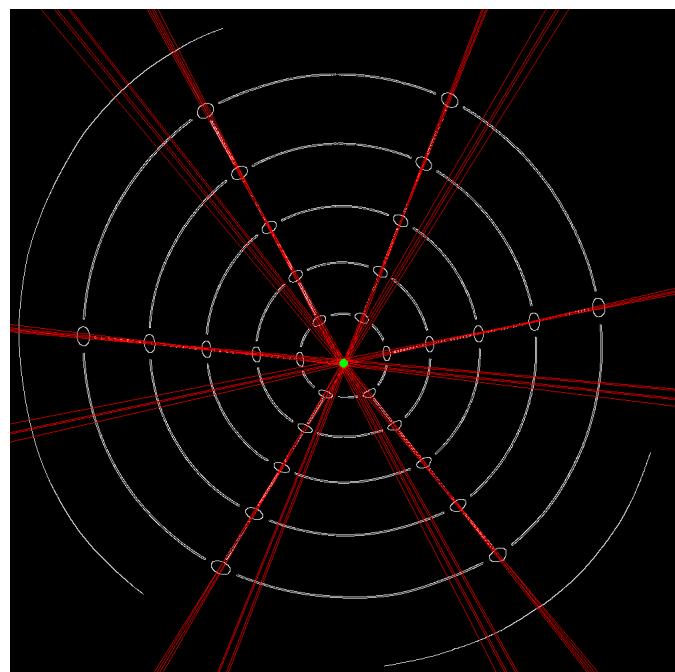
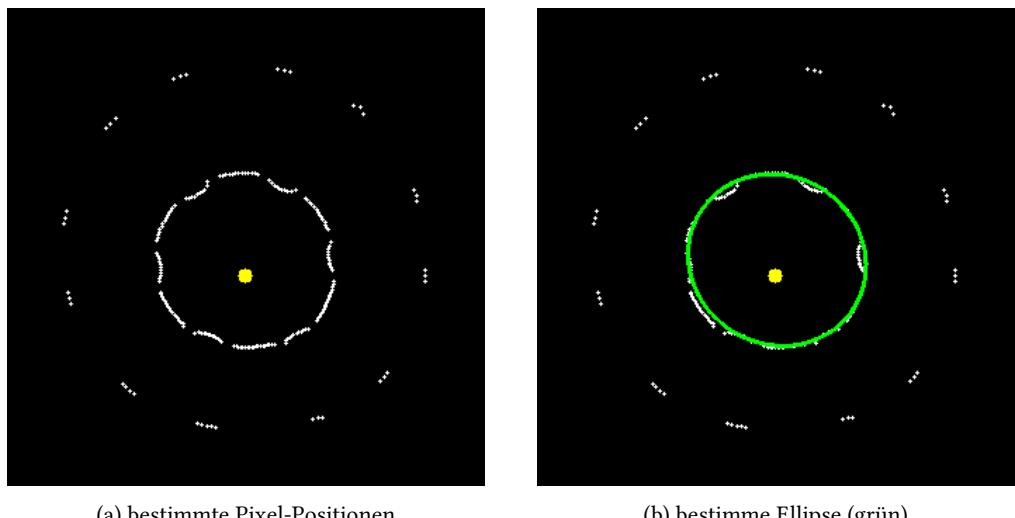


Abbildung 3.7.: Hough-Transformation zur Linien-Detektion (rot) und bestimmter Schnittpunkt (grün)



(a) bestimmte Pixel-Positionen

(b) bestimmte Ellipse (grün)

Abbildung 3.8.: Ellipsendetektion: bestimmte Pixel-Positionen (weiß), Aussendepunkt (gelb)

Mit Hilfe der Positionen der getroffenen Pixel, wird anschließend mittels RANSAC (siehe Kapitel 2.6) eine Ellipse geschätzt.

Für sechs zufällig ausgewählte Punkte wird konkret das lineare Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} x_1^2 & y_1^2 & x_1y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_6^2 & y_6^2 & x_6y_6 & x_6 & y_6 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

gelöst, was auf der Gleichung 2.19 aus Kapitel 2.7 basiert. Dabei wird die Polynomschreibweise einer Ellipse benutzt, da diese im Gegensatz zu der Form (x_0, y_0, a, b, θ) linear ist. Das Gleichungssystem ist ein lineares Gleichungssystem und kann mit herkömmlichen Methoden der Numerik gelöst werden. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch, dass nicht alle Werte für (a, b, c, d, e, f) eine nicht entartete reelle Ellipse definieren. Nach dem Lösen muss demnach geprüft werden, ob es sich tatsächlich um eine Ellipse handelt. Diese wird dann mittels Hauptachsentransformation, wie in Kapitel 2.7 beschrieben, in die Ellipsenform (x_0, y_0, a, b, θ) umgewandelt.

Um die für RANSAC benötigte Distanz zu berechnen, wird das Verfahren aus Kapitel 2.7.2 genutzt, was die exakte euklidische Distanz eines Punktes zu einer Ellipse in der Form (x_0, y_0, a, b, θ) approximiert. Ein Verfahren wie das Verfahren der kleinsten Quadrate anstelle von RANSAC funktioniert hier nicht, da die Kantenpixel bezüglich einer zu bestimmenden Ellipse von Ausreißern behaftet sind. Wird zum Beispiel auf Grund schlechter Lichtverhältnisse eine Kreislinie nicht deutlich aufgenommen, kann es in dem Kantenbild dazu kommen, dass Kreislinien nicht zusammenhängend sind und folglich treffen die ausgesendeten Strahlen teilweise die nächst äußere Kreislinie. Dieses Problem ist in Abbildung 3.9 zu sehen. Man sieht, dass die Anzahl der Pixel auf der Ellipse, deren Parameter geschätzt werden sollen, im Vergleich zur Abbildung 3.8 abgenommen hat. Die Strahlen treffen vermehrt auf die nächste äußere Ellipse. Die Ausreißeranzahl nimmt zu.

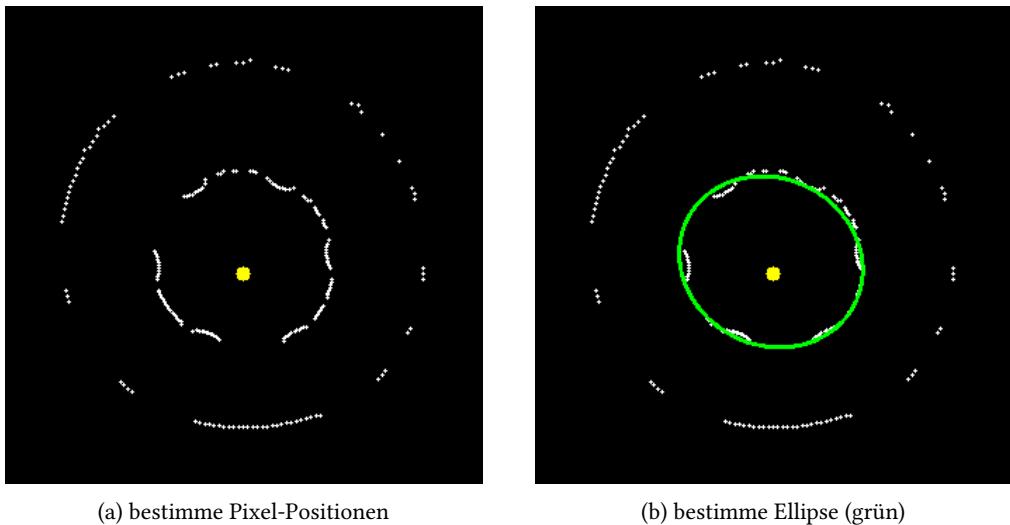


Abbildung 3.9.: Ellipsendetektion bei Ausreißern

Da die Laufzeit nicht im Vordergrund steht, kann eine großzügige Schätzung des Fehleranteils von $\epsilon = 0.4$ mit einer gewünschten Wahrscheinlichkeit $p = 0.9999$ gewählt werden, was zu einer Mindestanzahl an von circa 200 Iterationen führt (siehe Kapitel 2.6). Die letztendlich bestimmten Ellipsen sind beispielhaft in Abbildung 3.10 zu sehen.

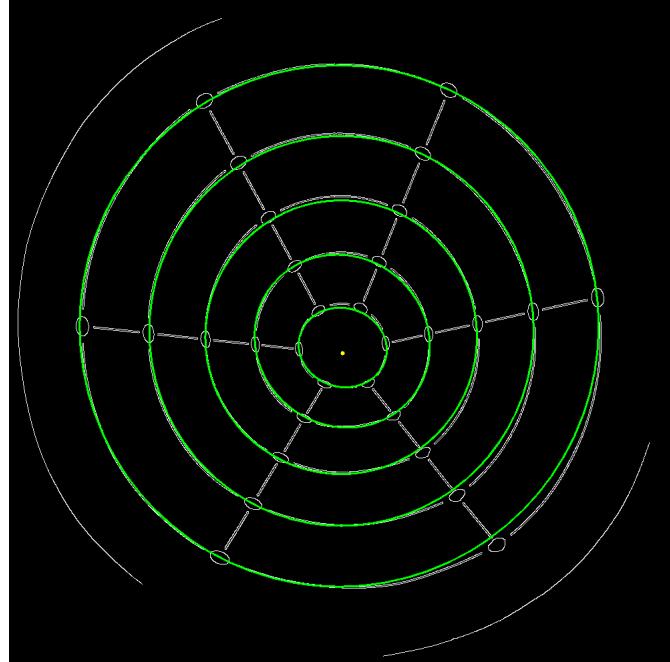


Abbildung 3.10.: detektierte Ellipsen

3.4.2. Analytical Deformable Templates

Als Alternative zu RANSAC können die Ellipsen auch mittels Analytical Deformable Templates (siehe Kapitel 2.8) detektiert werden. Dazu wird folgende Funktion betrachtet, deren Nullstellen eine um θ gedrehte Ellipse, mit Zentrum (x_0, y_0) und Haupt- und Nebenachse a und b beschreiben.

$$G(x, y) = \frac{((x - x_0) \cos \theta + (y - y_0) \sin \theta)^2}{a^2} + \frac{((x - x_0) \sin \theta - (y - y_0) \cos \theta)^2}{b^2} - 1$$

Die Ellipse lässt sich, wie in Kapitel 2.1, auch parametrisch beschreiben, durch die Funktion

$$H(\phi) = \begin{pmatrix} x_0 + a \cos \phi \cos \theta - b \sin \phi \sin \theta \\ y_0 + a \cos \phi \sin \theta + b \sin \phi \cos \theta \end{pmatrix}$$

mit $\phi \in [0, 2\pi)$.

Es wird nun eine Energiefunktion konstruiert

$$E = E_M + E_A + E_S,$$

die sich zusammensetzt aus einem Term E_M , der die Kantenstärke auf dem Ellipsenrand maximiert, sowie einem Term E_A , der die Winkelähnlichkeit zwischen Ellipsennormale und Gradientenrichtung des Bildes maximiert. Darüber hinaus wird ein Term E_S hinzugefügt, der die Ellipse schrumpfen lässt.

Konkret sehen die Terme wie folgt aus

$$\begin{aligned} E_M &= -\alpha \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I_M(p_i) \\ E_A &= \beta \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \left(I_O(p_i) - \text{atan2}\left(\frac{\partial G}{\partial y}(p_i), \frac{\partial G}{\partial x}(p_i)\right) \right)^2 \\ E_S &= \gamma \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-2} (p_i - p_{i+1})^2, \end{aligned} \quad (3.1)$$

wobei n die Anzahl der Punkte auf dem Ellipsenrand sind. p_i ist definiert als der i -te Punkt auf der Ellipse, also als $H(\phi_i)$ mit $\phi_i = \frac{i}{n} \cdot 2\pi \forall i = 0, \dots, n-1$. Der Term $I_M(p_i)$ ist definiert als $I_M(p_i) = \sqrt{I_x(p_i)^2 + I_y(p_i)^2}$, wobei I_x , sowie I_y für die diskreten partiellen Ableitungen nach x , respektive y stehen. Durch $I_M(p_i)$ wird somit die Kantenstärke in Punkt p_i angegeben. Der Term $I_O(p_i)$ ist definiert als $I_O(p_i) = \text{atan2}(I_y(p_i), I_x(p_i))$ und beschreibt somit die Gradientenrichtung der Kanten.

Man wählt dabei als Startwert eine Ellipse, deren Zentrum dem Bildzentrum entspricht und deren Hauptachse und Nebenachse möglichst groß sind ($a = w/2$ und $b = h/2$ für ein Bild mit Breite w und Höhe h) und bestimmt dann numerisch ein Minimum der Funktion. Der Term E_M wird minimal, wenn entlang der Ellipse die Kantenstärke groß ist. Der Term E_A wird minimal, wenn die Winkel der Normalenvektoren ähnlich zu denen der Kanten sind und E_S wird minimal, wenn die Distanz aufeinanderfolgender Ellipsenpunkte klein wird, also der Ellipsenumfang klein wird. Der Term lässt die Ellipse schrumpfen. α , β und γ steuern hierbei den Einfluss der einzelnen Terme. Das Minimum der Funktion sollte die äußerste Ellipse im Kalibrierungsmuster sein. Anschließend wird diese Ellipse vom Bild entfernt und man sucht wiederholt Minima der Funktion, bis alle Ellipsen detektiert wurden.

3.5. Zuordnung der Punkte

Nach der Bestimmung der Ellipsen muss jede Sample-Position der zugehörigen Kreislinie, sowie dem zugehörigen Liniensegment zugeordnet werden, um seine Position auf dem Kegel bestimmen zu können. Zunächst wird für jeden Punkt diejenige Kreislinie ausgewählt, deren zugehörige Ellipse die kürzeste Distanz zu ihm hat, wie in Abbildung 3.12(a) zu sehen. Die Farbe eines Samples entspricht hier der Farbe der zugeordneten Ellipse.

Um nun die Samples auch ihren Liniensegmenten zuzuordnen, wird zunächst der Mittelpunkt der Samples auf der innersten Ellipse bestimmt. Anschließend werden die Samples auf der innersten Ellipse nach dem Winkel der Verbindungslienien zwischen Sample und Mittelpunkt mit der x -Achse sortiert. Die restlichen Samples können nicht nach dem gleichen Schema sortiert werden, da der bestimmte Mittelpunkt nicht der genaue Schnittpunkt aller Liniensegmente ist. Das Problem ist in Abbildung 3.11(a) am Beispiel eines

Liniensegments für zwei Samples illustriert. Das bestimme Zentrum C liegt nicht auf der Verlängerung des Liniensegments. Die Winkel der Verbindungslinien zum Zentrum α_1 , sowie α_2 unterscheiden sich. Bei einer Sortierung nach Winkel ist nicht mehr gewährleistet, dass die sortierten Samples zu einer Verbindungslinie gehören, da die Winkel der Samples eines Liniensegments beliebig voneinander abweichen können. Damit dieses Verfahren funktioniert, müsste die Situation aus Abbildung 3.11(b) für alle Liniensegmente gelten, das heißt der Winkel (hier: β) ist für alle Verbindungslinien identisch.

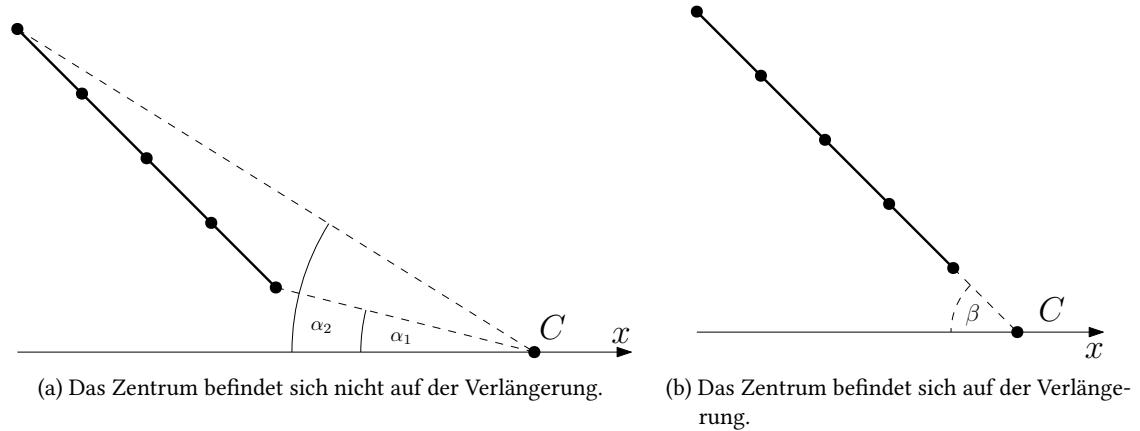


Abbildung 3.11.: Winkel der Samples zum bestimmten Zentrum

Stattdessen wird für jedes Sample auf den darauffolgenden Ellipsen das Sample auf der vorherigen Ellipse mit der kürzesten Distanz bestimmt. Die Samples können nun entsprechend sortiert werden. Die zugeordneten Liniensegmente sind exemplarisch in Abbildung 3.12(b) zu sehen.

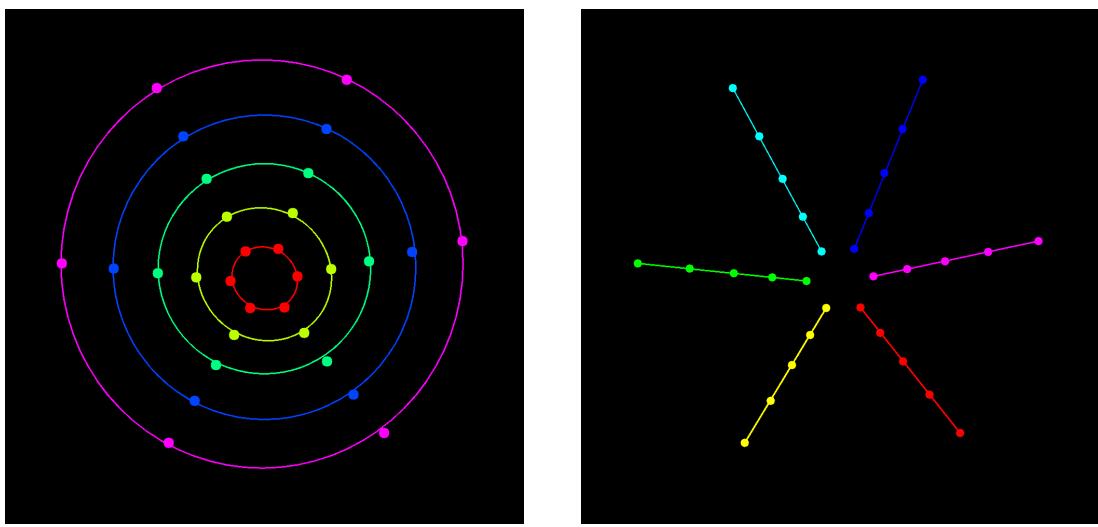


Abbildung 3.12.: Zuordnung von Punkten zu Ellipsen (links) und Liniensegmenten (rechts) farblich sortiert:
1. rot, 2. gelb, 3. grün, 4. blau, 5. magenta

Mit Hilfe dieser Zuordnung werden die Ellipsen erneut geschätzt. Die Samples dienen als Messpunkte und

das Verfahren der kleinsten Quadrate wird genutzt, da eine optimale Lösung für alle Samples angestrebt wird.

3.6. Bestimmung der Weltkoordinaten

Jedem Sample kann nun eine eindeutige Kreislinie, sowie ein eindeutiges Liniensegment zugeordnet werden. Damit Korrespondenzen zwischen den Samples und dem Kegel im Weltkoordinatensystem hergestellt werden können, müssen im nächsten Schritt jedem Sample dreidimensionale Koordinaten auf der Kegeloberfläche zugewiesen werden.

Mit Hilfe der Parametrisierung des Kegelstumpfs können die 3D-Koordinaten eines Samples folgendermaßen angegeben werden:

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit seien die Ellipsen $i = 0, \dots, n - 1$ aufsteigend nach ihrer „Größe“² sortiert. Außerdem seien die Liniensegmente $j = 0, \dots, m - 1$ aufsteigend nach ihrem Winkel mit der x -Achse, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, sortiert. Ein Sample kann demnach eindeutig durch ein Tupel $(i, j) \in [0, n - 1] \times [0, m - 1]$ identifiziert werden und (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) bezeichne seine Koordinaten im Weltkoordinatensystem.

Analog zur parametrischen Darstellung von Kegelstümpfen (Gleichung 2.2) in Kapitel 2.1 ergibt sich

$$\begin{aligned} x_{ij} &= r_i \cos \theta_j \\ y_{ij} &= h_i \\ z_{ij} &= r_i \sin \theta_j \end{aligned}$$

$\forall (i, j) \in [0, n - 1] \times [0, m - 1]$ mit

$$\begin{aligned} r_i &= r + \frac{i}{n - 1} \cdot (R - r) & \forall i \in [0, n - 1] \\ h_i &= \frac{i}{n - 1} \cdot \Delta H & \forall i \in [0, n - 1] \\ \theta_j &= \frac{j}{m - 1} \cdot 2\pi & \forall j \in [0, m - 1] \end{aligned}$$

entsprechend dem Aufbau des Kalibrierungsmusters.

3.7. Entfaltung

Die eigentliche Entfaltung des Kegels kann mit zwei unterschiedlichen Ansätzen realisiert werden. Die erste Möglichkeit ist die Vorwärtsentfaltung. Hierbei wird für jedes Pixel auf dem Kegelbild eine 3D-Koordinate durch geeignete Interpolation bestimmt und dann auf die Mantelfläche abgebildet. Beim zweiten Ansatz, der

²Etwas formaler könnte man die Ellipsen hier nach ihrem Flächeninhalt sortieren. Für Ellipsen $E_0(x_0, y_0, a_0, b_0, \theta_0)$ und $E_1(x_1, y_1, a_1, b_1, \theta_1)$ gilt $E_0 \leq E_1$ g.d.w. $\pi \cdot a_0 \cdot b_0 \leq \pi \cdot a_1 \cdot b_1$

Rückwärtsentfaltung, wird ein Punkt von der Mantelfläche zurück auf den Kegel abgebildet und von dort mit einer Projektionsmatrix auf die Bildebene projiziert und dann interpoliert.

3.7.1. Vorwärtsentfaltung

Bei der Vorwärtsentfaltung muss, wie oben erwähnt, zu jedem Pixel die zugehörige 3D-Koordinate im Weltkoordinatensystem berechnet werden. Da bisher jedoch nur die Positionen der Samples bekannt sind, muss hier entsprechend interpoliert werden.

Zunächst werden diejenigen Pixel betrachtet, die sich weder auf einer Kreislinie, noch auf einem Liniensegment befinden, betrachtet. Es gibt zu einem Pixel P also immer vier Sample-Nachbarn (b_l, b_r, t_r, t_l) . Diese Situation ist in Abbildung 3.13 illustriert.

Nachdem die vier Nachbarn bestimmt wurden, können im ersten Schritt die Abstände d_1 und d_2 von Pixel P zur inneren Ellipse E_b , respektive äußeren Ellipse E_t berechnet werden. Mithilfe dieser Abstände kann nun eine „Interpolationsellipse“ E_{int} definiert werden als

$$E_{int} = \left(\frac{d_1}{d_1 + d_2} \right) \cdot E_t + \left(\frac{d_2}{d_1 + d_2} \right) E_b,$$

wobei eine Multiplikation mit einem Skalar alle Charakteristika einer Ellipse skaliert. Der Drehwinkel θ wird hierbei bei 2π umgebrochen. Eine Addition geschieht elementweise. Im nächsten Schritt wird der Schnittpunkt L der Interpolationsellipse mit dem Liniensegment $\overline{b_l t_l}$, sowie der Schnittpunkt R mit dem Liniensegment $\overline{b_r t_r}$ bestimmt. Dafür wird einfach das Segment in Vektorschreibweise

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \end{pmatrix}$$

für $\lambda \in [0, 1]$ und zwei Punkte (x_0, y_0) , sowie (x_1, y_1) , nach einer Transformation in das Ellipsenkoordinatensystem³, in die implizite Gleichung der Ellipse

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

eingesetzt. Es wird nun die erhaltene quadratische Gleichung nach λ aufgelöst. Auf Grund der Wahl der Punkte (x_0, y_0) und (x_1, y_1) ergibt sich immer ein einziger Schnittpunkt.

Da sich t_l, L und b_l nun auf einem gemeinsamen Liniensegment befinden, kann bezüglich der Weltkoordinaten linear interpoliert werden. Analoges gilt für t_r, R und b_r . Die interpolierten Weltkoordinaten von L , sowie R werden als L_W und R_W bezeichnet.

Die drei Punkte (L, P, R) befinden sich auf der Interpolationsellipse und somit können die Winkel (ϕ_L, ϕ_P, ϕ_R) bezüglich des gemeinsamen Ellipsenkoordinatensystems bestimmt werden. Dazu wird die Ellipse, sowie der Punkt in das Ellipsenkoordinatensystem, transformiert. Diese Abbildung ist rigide und erhält somit Längen

³Im Ellipsenkoordinatensystem befindet sich die Ellipse im Ursprung und ist achsenausgerichtet

und Winkel. Die Ellipse kann nun parametrisch beschrieben werden durch

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cos \phi \\ b \sin \phi \end{pmatrix}$$

mit $\phi \in [0, 2\pi)$ und der Haupt- und Nebenachse a , beziehungsweise b . Zu einem gegebenen Ellipsenpunkt (x, y) kann nun der Winkel ϕ bezüglich der Ellipse bestimmen werden mit

$$\phi = \text{atan2}(y/b, x/a) \bmod 2\pi.$$

Analog zu oben werden nun die 3D-Koordinaten von P als lineare Interpolation zwischen den 3D-Koordinaten von L und R bestimmt. Als Interpolationsfaktor werden die Winkeldifferenzen $\frac{\phi_L - \phi_P}{\phi_L - \phi_R}$ benutzt. Für die Weltkoordinaten P_W des Pixels P gilt insgesamt:

$$P_W = \left(\frac{\phi_L - \phi_P}{\phi_L - \phi_R} \right) R_W + \left(1 - \frac{\phi_L - \phi_P}{\phi_L - \phi_R} \right) L_W.$$

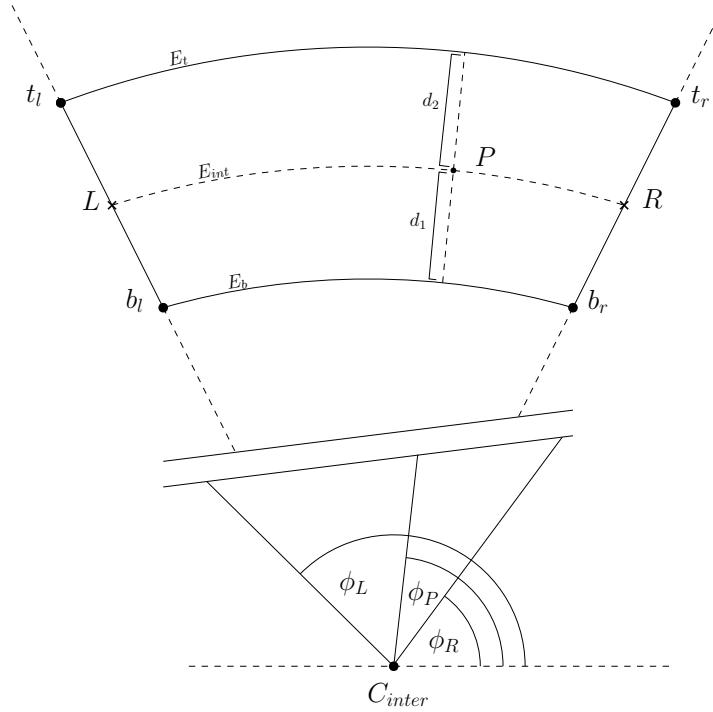


Abbildung 3.13.: Interpolation der 3D-Koordinaten mittels vier Sample-Nachbarn

Die Pixel, die sich auf Liniensegmenten befinden werden linear interpoliert. Die Punkte, die sich auf Kreislinien befinden, werden über Winkel interpoliert.

Jedes Pixel hat nun 3D-Koordinaten im Kegel erhalten. Mit Hilfe der konstruierten Abbildung 2.6 aus Kapitel 2.1, können nun die interpolierten Punkte auf die Mantelfläche abgebildet werden. Es ergibt sich schließlich das entzerrte Bild, wie es in Abbildung 3.14 exemplarisch dargestellt ist.

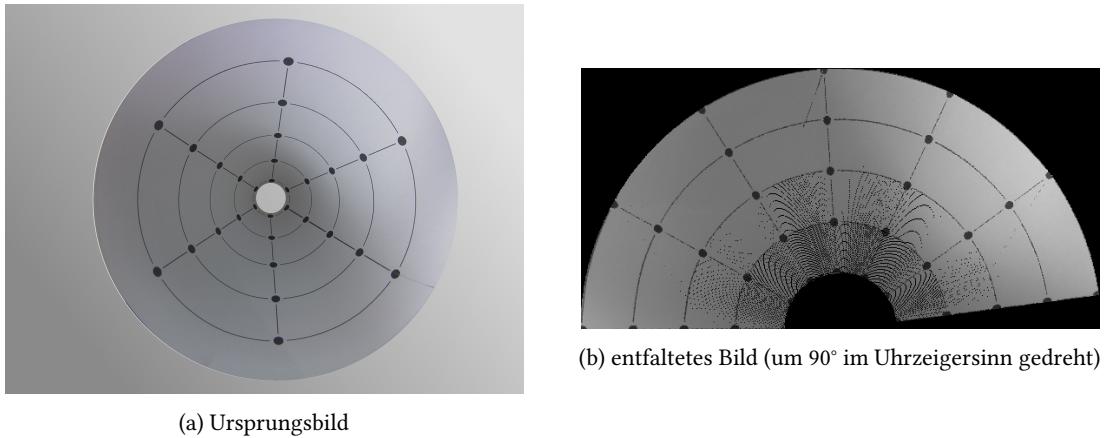


Abbildung 3.14.: Vorwärtsentfaltung

3.7.2. Rückwärtsentfaltung

Bei der Rückwärtsentfaltung geht man von dem entzerrten Bild aus, dessen geometrische Eigenschaften aus der parametrischen Form der Mantelfläche des Kegels bekannt sind und versucht rückwärts Pixelkandidaten im Ursprungsbild zu bestimmen.

Zunächst müssen für einen Punkt auf dem entzerrten Bild dreidimensionale Koordinaten auf der Kegeloberfläche berechnet werden. Dafür wird die konstruierte Umkehrabbildung 2.9 aus Kapitel 2.1 genutzt. Im nächsten Schritt müssen die erhaltenen Kegelkoordinaten auf das Ursprungsbild abgebildet werden, um die Pixelkandidaten bestimmen zu können.

Dazu wird eine Projektionsmatrix konstruiert. Wie in Kapitel 2.3 werden die Punktkorrespondenzen der Samples genutzt, um mittels Direct Linear Transformation eine Projektionsmatrix zu bestimmen. Es ergibt die gewünschte Abbildung, die auf jede 3D-Koordinate angewandt werden muss. Sie gibt Bildkoordinaten zurück. Im Allgemeinen sind diese Koordinaten nicht ganzzahlig und es muss entsprechend interpoliert werden (linear oder bikubisch siehe Kapitel 5).

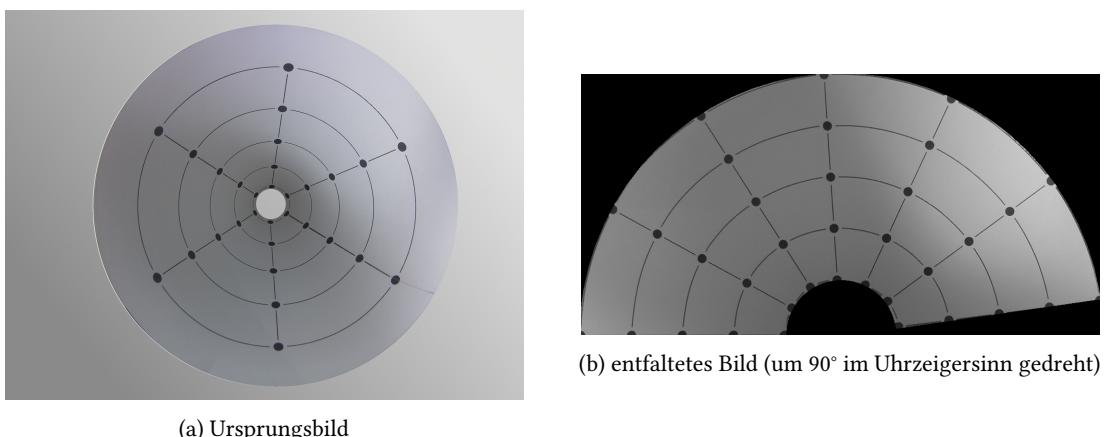


Abbildung 3.15.: Rückwärtsentfaltung

4. Implementierung

Zwecks Vereinfachung des Kalibrierungsprozesses wurde ein Assistent in Form einer graphischen Benutzeroberfläche implementiert.

Im ersten Schritt des Assistenten wird dabei optional, wie in Abbildung 4.1 zu sehen, eine intrinsische Kamerakalibrierung durchgeführt.

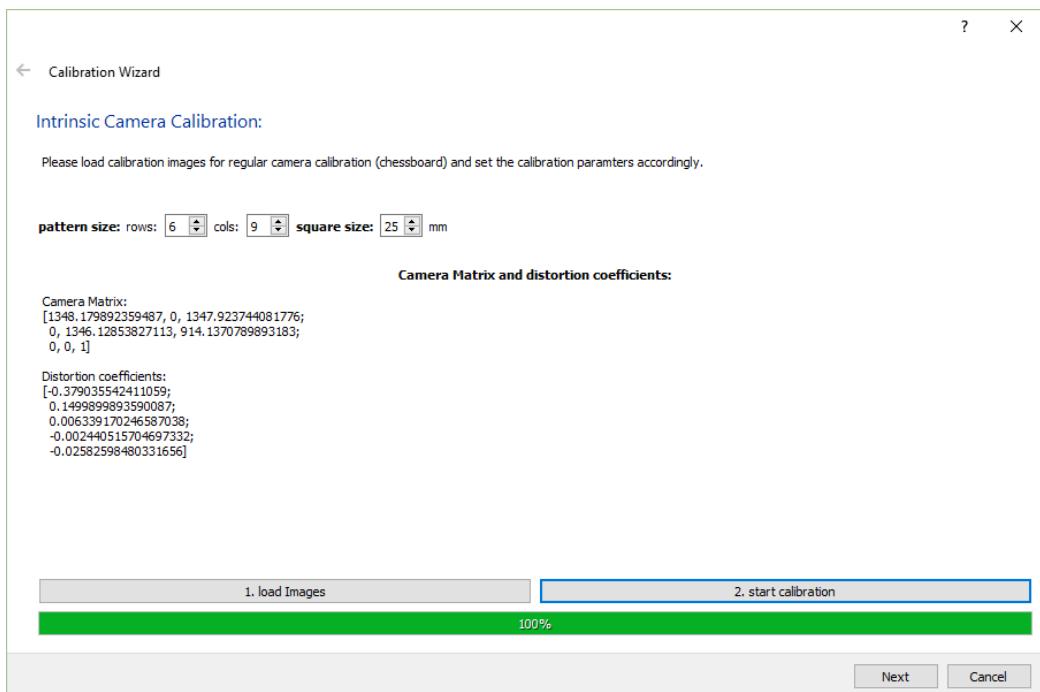


Abbildung 4.1.: Kalibrierungsassistent: intrinsische Kamerakalibrierung

Anschließend wird die eigentliche Kegelkalibrierung durchgeführt. Dabei wird zunächst das Kalibrierungsbild geladen und gegebenenfalls nach einer stattgefundenen intrinsischen Kalibrierung entzerrt. Die Anwendung versucht nun die Sample-Positionen zu erkennen und der Nutzer hat die Möglichkeit zu überprüfen, ob alle Positionen korrekt detektiert wurden und andernfalls fehlerhafte Punkte zu entfernen und / oder Samplepositionen hinzuzufügen. Im Anschluss werden die Ellipsen und Liniensegmente bestimmt und Punktcorrespondenzen hergestellt (siehe Abbildung 4.2).

Im letzten Schritt kann zwischen beiden Entfaltungsverfahren gewählt werden. Anschließend können die Einstellungen in eine XML-Datei exportiert werden, in der, neben der Kamera-Matrix und den Verzerrungs-

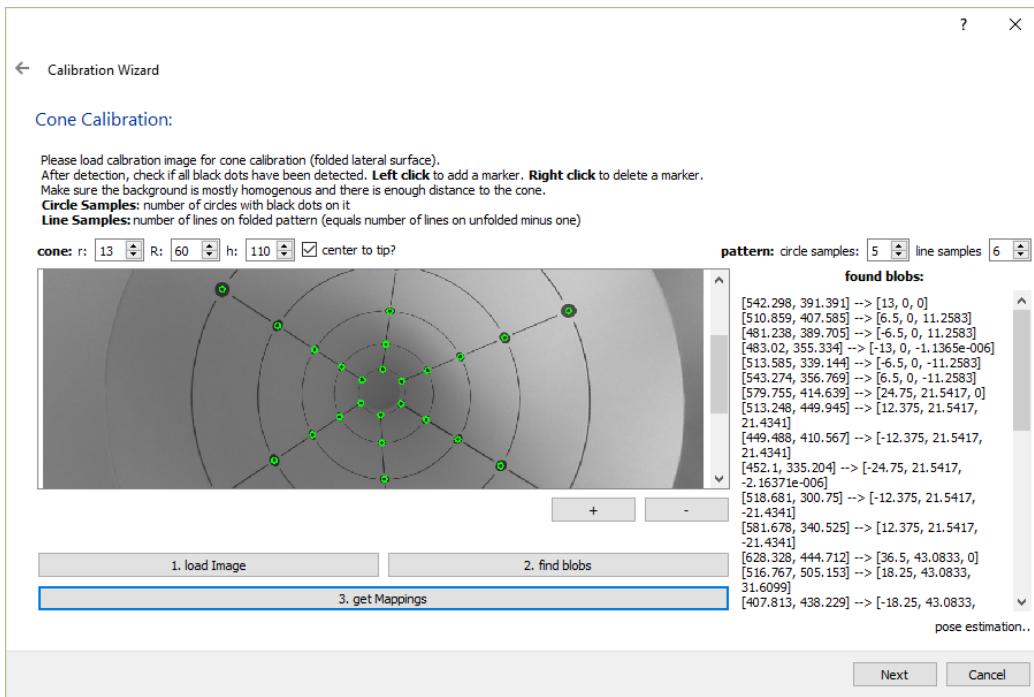


Abbildung 4.2.: Kalibrierungsassistent: Kegelkalibrierung

koeffizienten, auch die zwei Abbildungsmatrizen des ausgewählten Verfahrens gespeichert werden.

Die Abbildungsmatrizen sind dabei wie folgt aufgebaut: als *dst* wird das entfaltete Bild bezeichnet, *src* entspricht dem Ursprungsbild.

Bei der Vorwärtsentfaltung gilt:

$$dst(map_x(x, y), map_y(x, y)) = src(x, y),$$

wobei *map_x* und *map_y* die Abbildungsmatrizen sind und die gleiche Größe wie das Ursprungsbild haben. Für ein Pixel (x, y) auf dem Ursprungsbild *src* geben die Matrizen *map_x*, sowie *map_y* an, auf welche Position das Pixel auf dem entzerrten Bild abgebildet wird. *map_x(x, y)* bestimmt dabei die *x*-Koordinate, *map_y(x, y)* die *y*-Koordinate. Da bei der Entfaltung die Größe des Ergebnisbildes benötigt wird, und diese bei der Erstellung der Abbildungsmatrizen berechnet wurde, sind Breite und Höhe, in *map_x(0, 0)*, respektive *map_y(0, 0)* kodiert. Für das Pixel an der Position $(0, 0)$ auf dem Ursprungsbild ist anschließend keine Auswertung der Matrizen mehr möglich. Dieses Pixel ist jedoch ohnehin nicht Teil des Kegels.

Bei der Rückwärtsentfaltung gilt:

$$dst(x, y) = src((map_x(x, y), map_y(x, y))),$$

wobei map_x und map_y wieder die Abbildungsmatrizen sind, deren Aufbau analog zur Vorwärtsentfaltung ist. Der grundlegende Unterschied ist hier, dass von einem Punkt des entzerrten Bilds auf ein Pixel des Ursprungsbild geschlossen wird. Die Abbildungsmatrizen haben die gleiche Größe wie das entfaltete Bild. Eine Kodierung wie bei der Vorwärtsentfaltung ist nicht notwendig.

5. Analyse

Im folgenden Kapitel werden die beiden in Kapitel 3 vorgestellten Verfahren zur Entzerrung verglichen. Anschließend wird auf verschiedene Einflussfaktoren in Bezug auf die Qualität und Präzision der Entzerrung eingegangen, woraufhin deren Laufzeiten analysiert werden. Im letzten Teil des Kapitels werden beide Ansätze zur Ellipsendetektion evaluiert.

Die Laufzeitanalysen wurden dabei auf einem **Raspberry Pi 2 Model B** mit folgenden Eigenschaften durchgeführt:

- 900MHz quad-core ARM Cortex-A7 CPU
- 1GB RAM
- GCC-4.9.2
- Opencv 2.4.13

5.1. Vergleich Vorwärtsentfaltung und Rückwärtsentfaltung

Untersucht man die interpolierten Weltkoordinaten bei der Vorwärtsentfaltung, stellt man fest, dass die Oberfläche des Kegels, wie in Abbildung 5.1 zu sehen, eckig scheint. Zur Veranschaulichung wird hierbei nur ein Bruchteil der interpolierten Werte dargestellt. Zwischen den Samples auf einer Kreislinie sollten die interpolierten Positionen nach außen gewölbt sein, da ein Kegel rund ist. Da jedoch interpoliert und nicht extrapoliert wird, gehen die Werte nie über die zur Interpolation genutzten Werte hinaus. Konkreter kann eine interpolierte Position keine größeren oder kleineren x - und y -Koordinaten erhalten, als die der genutzten Samples. Diese wäre jedoch notwendig, sodass die Rundung des Kegels erhalten bleibt.

Darüber hinaus zeigt sich ein weiteres Problem nach der Entfaltung. Die Entfaltung geschieht über die Abbildung 2.6, die in Kapitel 2.1 konstruiert wurde. Damit im entfalteten Bild nicht 1mm einem Pixel entspricht, müssen die erhaltenen Werte skaliert werden. Dabei soll entsprechend einer gewünschten Ausgabeauflösung der entzerrten Seitenhöhe skaliert werden. Auch schon bei kleineren Skalierungen entstehen auffällige Lücken im entfalteten Bild, die in Abbildung 5.2 exemplarisch zu sehen sind. Grund dafür ist, dass jedes Pixel aus dem Ursprungsbild auf eine 2D-Koordinate der Mantelfläche abgebildet wird. Auch nach einer Skalierung handelt es sich bei diesen Werten im Allgemeinen nicht um ganzzahlige Werte. Es entstehen Rundungsfehler. Auch wenn es keine Rundungsfehler gäbe, würde es auf Grund der starken Stauchung in den inneren, kleineren Regionen (siehe Abbildung 5.2 in rot) des Ursprungsbild an genügend

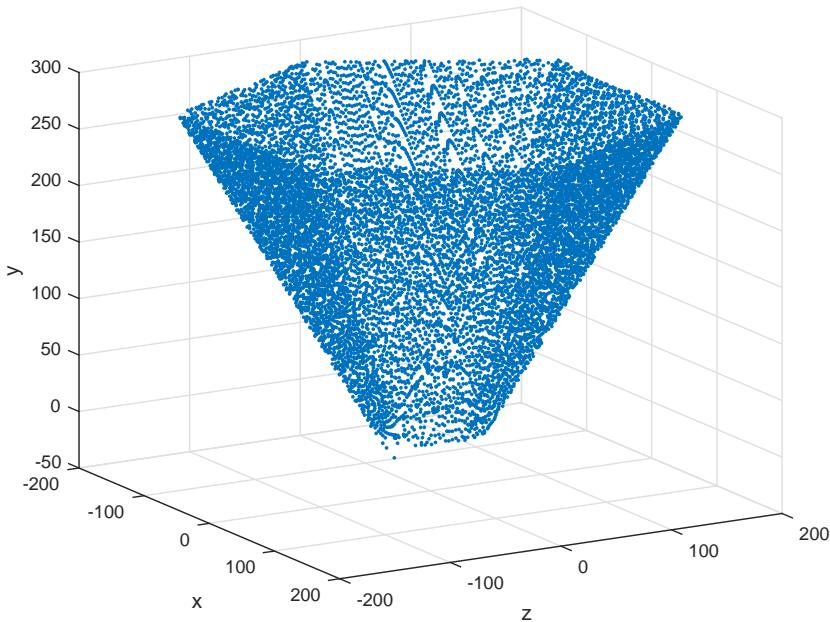


Abbildung 5.1.: interpolierter Kegel

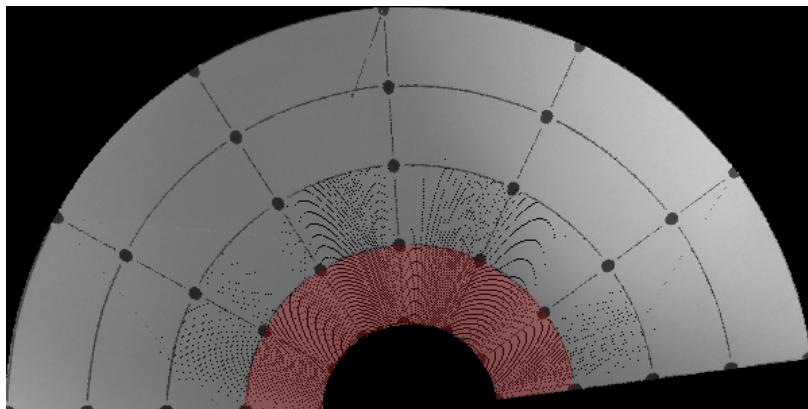


Abbildung 5.2.: Vorwärtsentfaltung

Bildinformation fehlen. Solche Lücken, beziehungsweise nicht erreichte Pixel auf dem entfalteten Bild, werden als Defekte bezeichnet.

Da vom Ursprungsbild auf das entfaltete Bild abgebildet wird, ist außerdem eine Interpolation auf dem Ursprungsbild nicht möglich, da vorher nicht bekannt ist, wo Defekte entstehen. Man müsste entweder auf dem resultierenden Bild interpolieren (siehe Kapitel 6), oder zu gegebenen Defekten über die Umkehrabbildung auf Pixelkandidaten im Ursprungsbild schließen und dann entsprechend interpolieren. Es bietet sich dann jedoch an, direkt die Umkehrabbildung zu nutzen, was die Motivation hinter der Rückwärtsentfaltung ist.

Es soll untersucht werden, wie sich die Anzahl der Defekte bei einer Änderung der Ausgabeauflösung der Seitenhöhe verhält. Diese Beziehung lässt sich in Abbildung 5.3 ablesen.

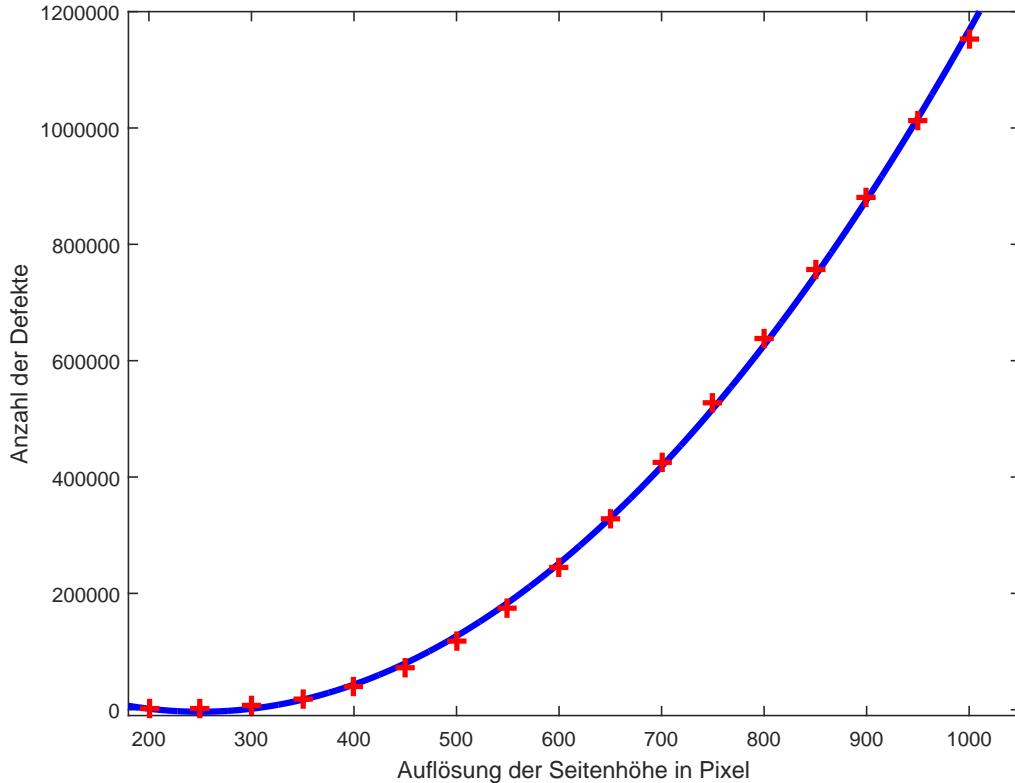


Abbildung 5.3.: Einfluss der Ausgabeauflösung auf die Anzahl der Defekte

Wie erwartet, verhält sich die Anzahl der Defekte quadratisch zur gewählten Ausgabeauflösung. Der Informationsgehalt (Pixelanzahl) des Ursprungsbild bleibt trotz erhöhter Ausgabeauflösung konstant. Wie in Abbildung 5.4 zu sehen, verhält sich die Ausgabeauflösung $ress$ quadratisch zur Gesamtzahl der Pixel für ein konstantes α . Für die Breite b des Ausgabebildes gilt $b = ress$. Die Höhe h setzt sich wie folgt zusammen: $h = ress + ress \cdot \cos(2\pi - \alpha) = ress \cdot (1 + \cos(2\pi - \alpha)) = ress \cdot (1 + \cos \alpha)$. Dazu betrachtet man das rechtwinklige Dreieck in der rechten oberen Ecke der Abbildung (in magenta). Die Hypotenuse des Dreiecks beträgt $ress$ und mit $\beta = 2\pi - \alpha$ ergibt sich für die Ankathete eine Länge von $ress \cdot \cos(2\pi - \alpha)$. Die Gesamtzahl der Pixel beträgt demnach $b \cdot h = ress^2(1 + \cos(\alpha))$ und verhält sich quadratisch zu $ress$.

Obwohl die Laufzeit der Kalibrierung nicht im Vordergrund steht, wird an dieser Stelle die Laufzeit beider Verfahren bei verschiedenen Auflösungen der Seitenhöhe verglichen. Da der Großteil des Kalibrierungsprozesses bei beiden Verfahren identisch ist, wird nur der Teil verglichen, der sich unterscheidet. Das heißt bei der Vorwärtsentfaltung wird die Laufzeit für die Interpolation der Weltkoordinaten und die anschließende Abbildung auf die Mantelfläche gemessen und bei der Rückwärtsentfaltung die Laufzeit für die Abbildung auf die Kegelkoordinaten, die Bestimmung der Projektionsmatrix und die anschließende Abbildung auf die

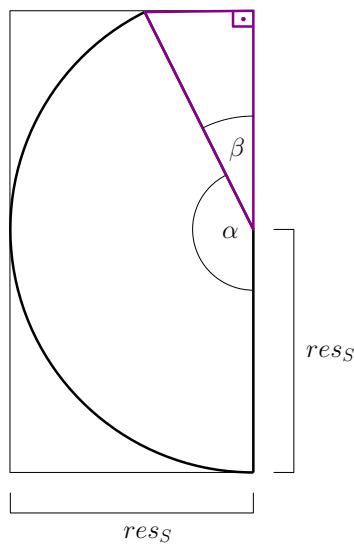


Abbildung 5.4.: Größe des Ausgabebildes bei einer Seitenhöhe von $resS$

Bildkoordinaten, inklusive Interpolation.

Wie in Abbildung 5.5 zu sehen, ist der Aufwand bei der Vorwärtsentfaltung weitestgehend konstant. Dies ist dadurch zu begründen, dass sich die Eingabeauflösung nicht ändert. Der Interpolationsaufwand bleibt gleich und es wird anschließend die gleiche Anzahl Pixel auf die Mantelfläche abgebildet. Nur der Ort der Projektion wird entsprechend der Ausgabeauflösung skaliert. Bei der Rückwärtsentfaltung hingegen, wächst der Interpolationsaufwand quadratisch. Dort wird von dem Ausgabebild ausgegangen, das quadratisch mit der Auflösung wächst und dann jeder Punkt auf das Ursprungsbild abgebildet. Je mehr Pixel auf dem Ausgabebild sind, desto häufiger muss interpoliert werden. Bei einer Auflösung der Seitenhöhe von 850 Pixeln ist die Laufzeit bei beiden Verfahren gleich.

Als Reprojektionsfehler einer Abbildung wird die Distanz zwischen einem gemessenen Punkt und einem korrespondierendem (durch die Abbildung) projizierten Punkt bezeichnet.

Im Falle der Rückwärtsentfaltung sind die gemessenen Punkte die Bildpositionen der Samples im Ursprungsbild. Durch die gegebene Geometrie des Kegels ist bekannt, wo sich die Samples auf dem entfalteten Bild befinden müssen (siehe Parametrisierung der Mantelfläche 2.3 in Kapitel 2). Diese Positionen können nun mit Hilfe der Abbildung zur Entfaltung und der Projektionsmatrix zurück auf das Ursprungsbild abgebildet werden. Diese Punkte sind die projizierten Punkte. Da die Abbildung von der Mantelfläche zur Kegeloberfläche exakt ist, wird der Reprojektionsfehler der Rückwärtsentfaltung alleine durch die Projektionsmatrix bestimmt.

Bei der Vorwärtsentfaltung sind die gemessenen Punkte durch die bekannten Sample-Positionen auf der Mantelfläche gegeben. Die projizierten Punkte erhält man durch Abbildung der detektierten Sample-Positionen des Ursprungsbild auf die Mantelfläche. Der Reprojektionsfehler ist alleine durch die Genauigkeit der Sample-Detektion definiert und somit bei diesem Verfahren immer nahe null. Obwohl das Endergebnis, bedingt durch die Defekte, bei der Vorwärtsentfaltung optisch schlechter ist, ist der Reprojektionsfehler bei der

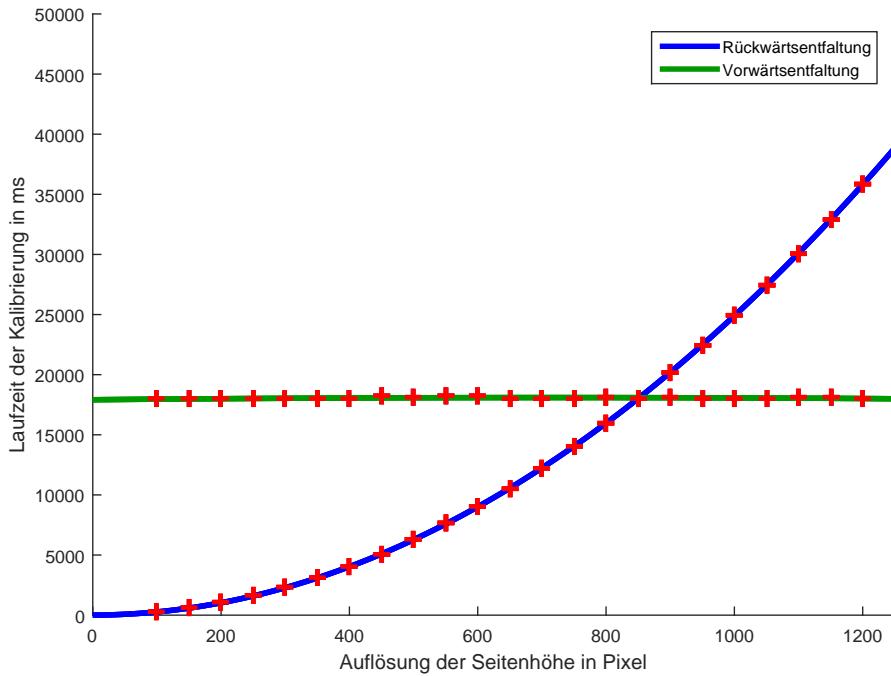


Abbildung 5.5.: Laufzeitvergleich zwischen Vorwärtsentfaltung (blau) und Rückwärtsentfaltung (rot)

Vorwärtsentfaltung im Allgemeinen kleiner. Als Vergleich zwischen den beiden Verfahren eignet sich der Reprojektionsfehler demnach nicht.

Auf Grund der fehlenden Defekte bei der Rückwärtsentfaltung und der besseren Laufzeit bei Auflösungen bis 850 Pixeln, beziehen sich alle folgenden Auswertungen nur noch auf die Rückwärtsentfaltung.

5.2. Einfluss der intrinsischen Kalibrierung

Ein wichtiger Einflussfaktor in Bezug auf die Qualität der Entzerrung ist die intrinsische Kamerakalibrierung, die vor der eigentlichen Kegelkalibrierung stattfindet. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, die Linsenverzerrungen der Kamera herauszurechnen.

Der Einfluss der Kamerakalibrierung wird mit Hilfe des Reprojektionsfehlers gemessen. Dazu werden fünf verschiedene Bilder untersucht, die ein Mal mit und ein Mal ohne intrinsische Kalibrierung entzerrt werden. Bei beiden Gruppen wird anschließend jeweils der Reprojektionsfehler pro Sample bestimmt und verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.6 zu sehen. In der linken Abbildung sind hierbei die Fehler im kalibrierten Fall zu sehen, in der Rechten im unkalibrierten Fall. In der Abbildung ist dabei ein Kreuz an der Stelle (u, v) , falls die Abweichung des projizierten Punktes in x -Richtung u , sowie in y -Richtung v beträgt.

Es ist klar zu erkennen, dass der Reprojektionsfehler bei den Bildern ohne intrinsische Kamerakalibrierung wesentlich größer ist. Der starke Einfluss kommt unter Anderem daher, dass eine Weitwinkelkamera mit

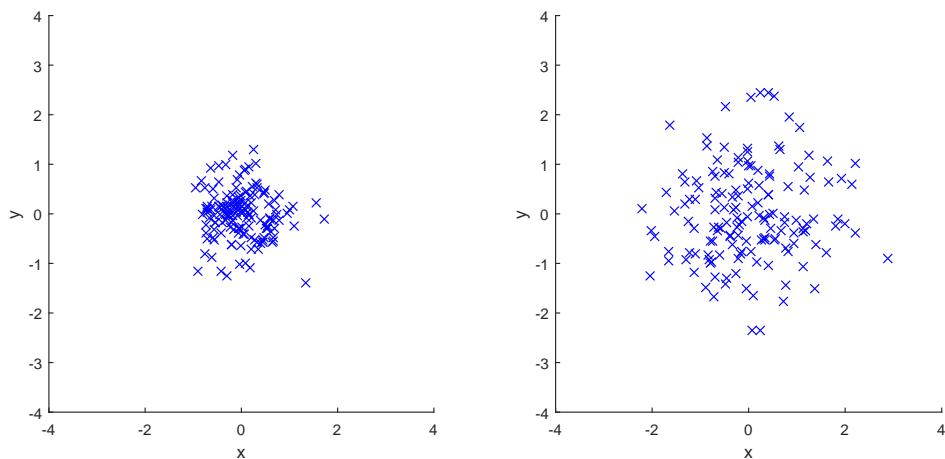


Abbildung 5.6.: Einfluss der intrinsischen Kalibrierung auf den Reprojektionsfehler

starker tonnenförmiger Verzerrung eingesetzt wurde. Ohne eine Modellierung der Linsenverzerrungen weichen die Abstände zwischen den Sample-Positionen stark von der Realität ab. Die Projektionsmatrix wird mit fehlerhaften Daten bestimmt. Die eigentlichen Sample-Positionen auf dem entzerrten Bild werden nicht korrekt auf die Sample-Positionen im Ursprungsbild abgebildet.

5.3. Einfluss der Rotation der Kamera

Um den Einfluss der Rotation der Kamera untersuchen zu können, wurde der Kegel mittels Blender¹ mit Kalibrierungsmuster gerendert, da die Kameraposition dann exakt bekannt ist und äußere Faktoren wie Lichtverhältnisse und inhomogene Hintergründe kontrolliert werden können. In Abbildung 5.7 ist zu zwei unterschiedlichen Betrachtungswinkeln der gerenderte Kegel zu sehen.

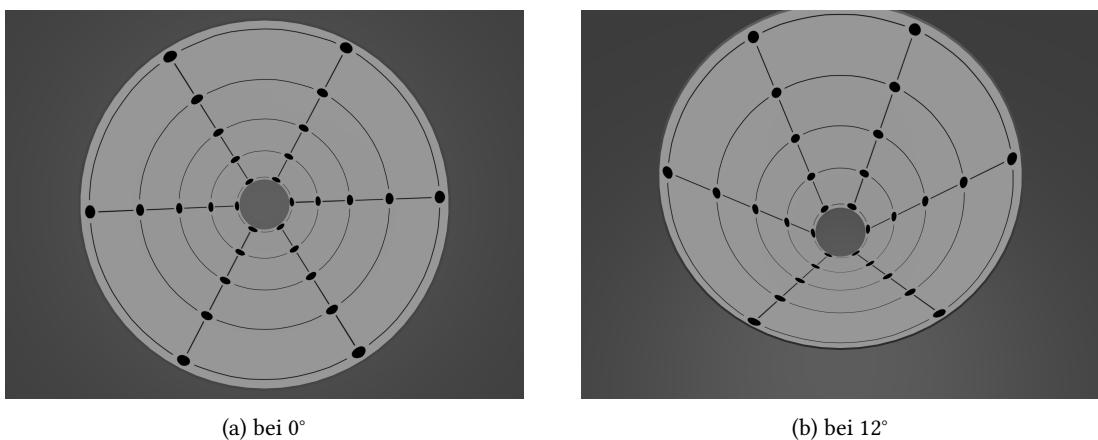


Abbildung 5.7.: gerendeter Kegel mit Kalibrierungsmuster aus verschiedenen Blickrichtungen

¹Blender (Version 2.77a), *Blender Foundation*, www.blender.org

Es werden anschließend Bilder erzeugt, in denen in 1° Schritten die Kamera von 0° bis 16° um die x -Achse rotiert wird. Für jedes dieser Bilder wird anschließend eine Rückwärtsentfaltung durchgeführt und der durchschnittliche Reprojektionsfehler ermittelt. Abbildung 5.8 zeigt, dass der Reprojektionsfehler relativ rotationsinvariant ist. Der durchschnittliche Reprojektionsfehler beträgt 1.925. Ab einem Winkel von 13° , werden die Samples teilweise vom Blob-Detektor nicht mehr erkannt (bei 13° und 14° werden zwei nicht erkannt, bei 15° und 16° jeweils vier) und mussten per Hand markiert werden. Ab einem Winkel von 16° sind die Abstände zwischen den Kreislinien so klein, sodass die Ellipsendetektion fehlschlägt.

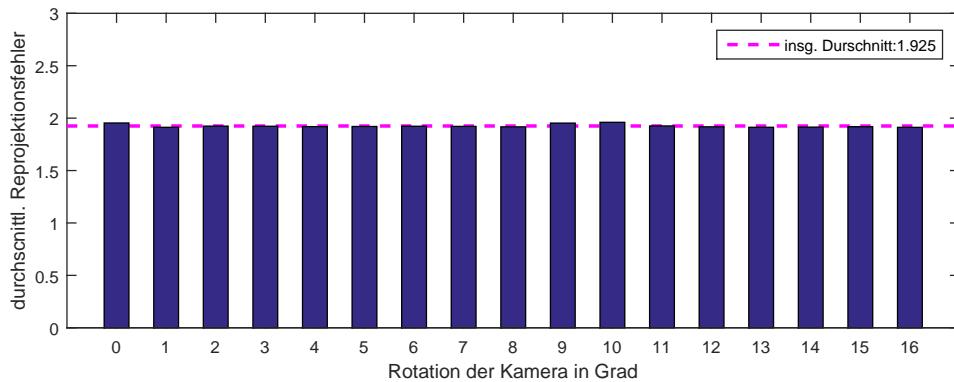


Abbildung 5.8.: Einfluss der Rotation der Kamera auf den Reprojektionsfehler

5.4. Laufzeit der Entfaltung

Der Kalibrierungsprozess liefert zwei Abbildungsmatrizen (siehe Kapitel 4), mit denen anschließend eine Reihe von Bildern entzerrt werden sollen. Untersucht wird dabei die Laufzeit pro gewählter Auflösung in 50er Schritten, jeweils gemittelt über 200 Bilder, mit bikubischer, sowie mit (bi-) linearer Interpolation.

Im Gegensatz zu linearer Interpolation, werden bei bikubischer Interpolation 16 Nachbarn statt vier betrachtet und mittels (stückweise stetiger) Polynome interpoliert. Der Aufwand bei der bikubischen Interpolation ist wesentlich größer, es entstehen aber weniger Artefakte [Key81].

Wie in Abbildung 5.9 zu sehen, wächst die Laufzeit bei beiden Verfahren quadratisch mit der Auflösung der Seitenhöhe. Die Laufzeit des Verfahrens mittels bikubischer Interpolation wächst dabei um einen Faktor von circa 1.35 schneller, als das Verfahren mittels linearer Interpolation.

5.5. Evaluierung der Ellipsendetektion mittels Deformable Templates

Das Problem bei der Ellipsendetektion mittels Deformable Templates ist, dass die Energiefunktion, auch nach starker Glättung des Kanten- und Kantenrichtungsbildes, schnell in vergleichsweise schwache lokale Minima läuft, obwohl ein wesentlich ausgeprägtes Minimum in näherer Umgebung wäre.

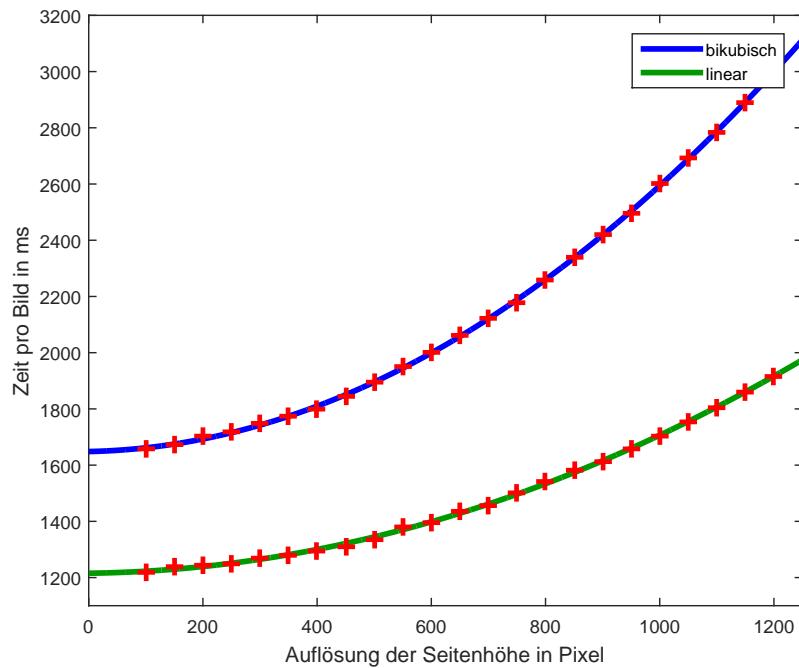


Abbildung 5.9.: Einfluss der Ausgabeauflösung auf die Laufzeit der Entfaltung

In Abbildung 5.10 sieht man beispielhaft einen Auschnitt der Energiefunktion, wobei in diesem Fall zwecks Veranschaulichung nur die Haupt- und Nebenachse der Ellipse variabel sind. Die x -Achse steht für die Hauptachse, die y -Achse für die Nebenachse und die z -Achse für den Wert der Energiefunktion. Das Zentrum bleibt das Zentrum des Bildes und der Winkel θ ist konstant null. Trotz dieser Einschränkungen lässt sich gut erkennen, dass sich bei circa $a = b = 350$ ein ausgeprägtes lokales Minimum befindet. Es gibt jedoch neben diesem Minimum in näherer Umgebung schwächere Minima, wie beispielsweise in $(350, 260)$. Solche „Becken“ (in rot markiert) erschweren die Detektion erheblich.

Darüber hinaus muss für ein robustes und effizientes Optimierungsverfahren der Gradient und im besten Fall sogar die Hesse-Matrix der zu minimierenden Funktion zur Verfügung gestellt werden. Jede Ableitung des Kanten- und Kantenorientierungsbilds bringt Unstetigkeitsstellen mit sich. Mit einer zu starken Glättung geht jedoch viel Informationsverlust einher.

5.6. Evaluierung der Ellipsendetektion mittels RANSAC

Die robuste Ellipsendetektion ist der wichtigste Schritt bei der Entzerrung. Bei beiden Verfahren werden die bestimmten Ellipsen genutzt um Korrespondenzen zwischen den Sample-Positionen und Punkten auf dem Kegel im Weltkoordinatensystem herzustellen. Bei der Vorwärtsentfaltung werden die Ellipsen darüber hinaus benötigt, um für die Pixel geeignete 3D-Koordinaten interpolieren zu können. Es ist also von großer Bedeutung, wie gut die Ellipsendetektion mittels RANSAC funktioniert.

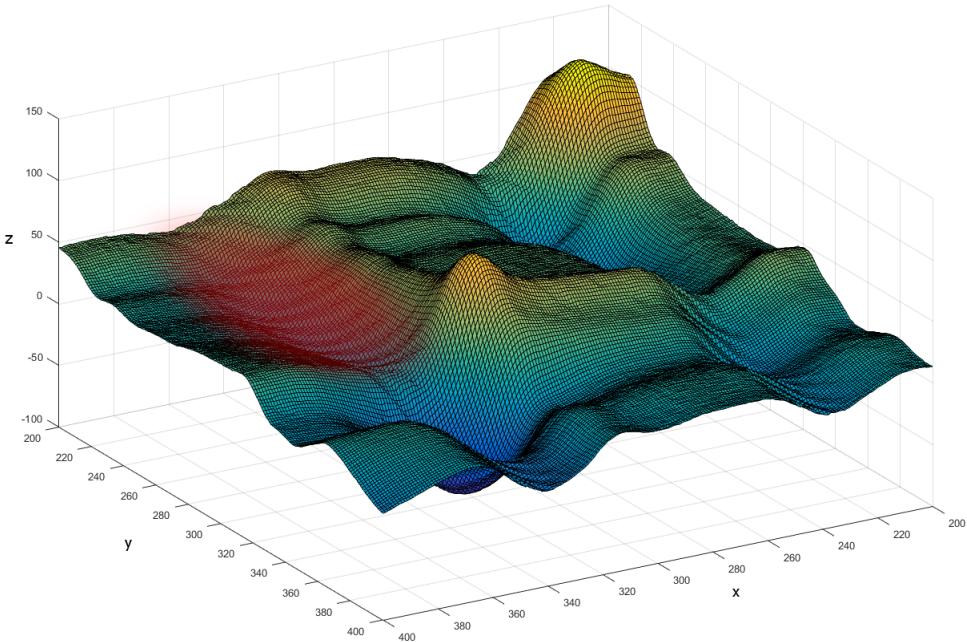


Abbildung 5.10.: Deformable Templates: Ausschnitt der Energiefunktion für variable Haupt- und Nebenachse

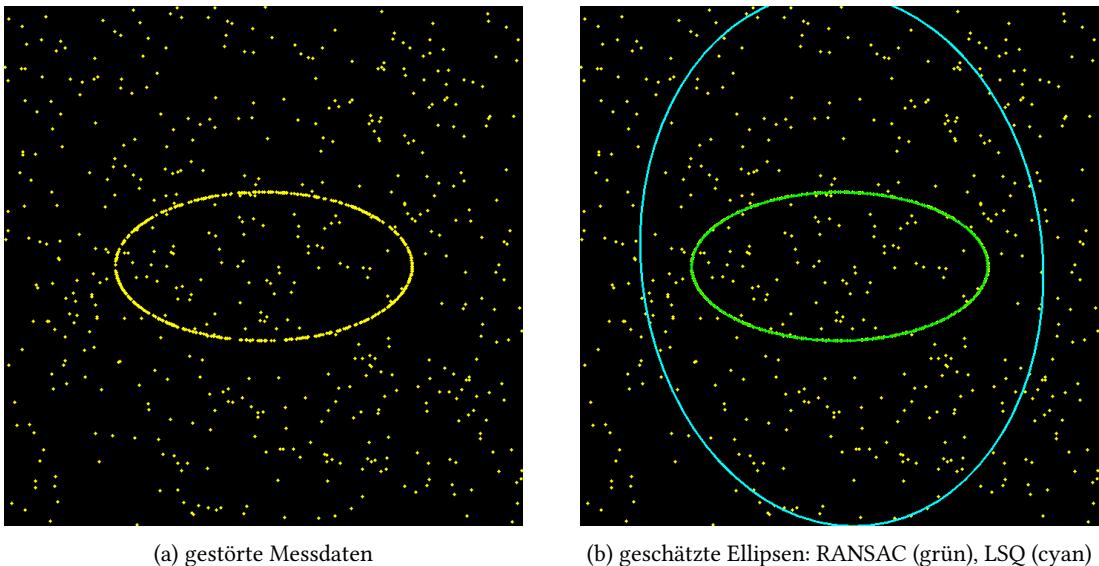


Abbildung 5.11.: Vergleich RANSAC und LSQ bei gleichverteilten Ausreißern $\epsilon = 0.5, p = 0.99$

Zunächst wird untersucht, wie sich eine Gleichverteilung von Ausreißern auf die Schätzung der Ellipse auswirkt. Wie in Abbildung 5.11(a) zu sehen, werden zunächst 500 gleichverteilte Punkte auf einer Ellipse erzeugt. Anschließend werden auf dem gesamten Bild gleichverteilt, zu einem gegebenen Fehleranteil, Ausreißer konstruiert. Der Fehleranteil wird schrittweise von 0% bis 60% inkrementiert und die Schätzungen durch RANSAC und der Methode der kleinsten Quadrate mit der eigentlichen Ellipse verglichen. Als Fehlermaß wird der Dice-Koeffizient [Dic45] genutzt. Es gilt

$$D = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|} \in [0, 1]$$

für zwei Mengen A und B mit einem Wert von eins für eine perfekte Übereinstimmung ($A = B$) und einem Wert von null, falls $A \cap B = \emptyset$. Es wird hierbei die Fläche zweier Ellipsen, beziehungsweise deren Schnittfläche, betrachtet. Da die Berechnung der Schnittfläche zweier Ellipsen analytisch sehr aufwändig ist [Ebe08], wird stattdessen jeweils die Menge der gemeinsamen Pixel zweier auf ein Bild gezeichneter Ellipsen bestimmt. Die Anzahl der Iterationen für RANSAC kann in jedem Schritt mit Hilfe der Formel aus Kapitel 2.6 berechnet werden.

In Abbildung 5.12 sieht man, dass die Dice-Koeffizienten bei RANSAC konstant nahezu bei eins liegen. Das heißt, dass mittels RANSAC auch bei einem Fehleranteil von 60% immer noch mit sehr großer Genauigkeit die Ellipse korrekt geschätzt wird. Bei der Methode der kleinsten Quadrate weicht die geschätzte Ellipse jedoch schon bei einem kleinen relativen Fehleranteil von 10% mit einem Dice-Koeffizienten von circa 0.5 stark von der korrekten Ellipse ab.

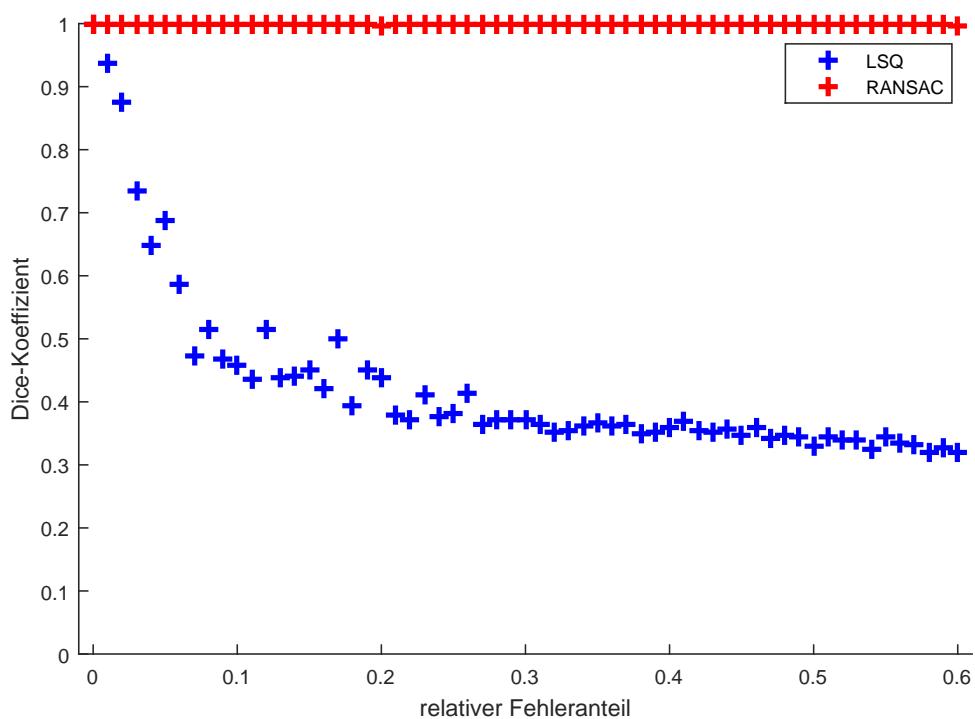


Abbildung 5.12.: Dice-Koeffizienten bei einer Schätzung mittels RANSAC und der Methode der kleinsten Quadrate (LSQ) bei gleichverteilten Ausreißern

Im genutzten Verfahren ist eine Gleichverteilung der Ausreißer unwahrscheinlich. Viel wahrscheinlicher ist es, dass eine der nächst äußeren Ellipsen frühzeitig sichtbar wird (siehe Kapitel 3.4). Dieser Fall ist in Abbildung 5.13 illustriert. Es soll nun untersucht werden, wie stark solche Ellipsen das korrekte Ergebnis beeinflussen. Ein Fehleranteil von 50% bedeutet hier, dass auf der inneren Ellipse genauso viele Punkten

sind, wie auf der äußeren.

In Abbildung 5.14 sieht man, dass bei der Schätzung mittels RANSAC die Dice-Koeffizienten bis circa 50% nahezu bei eins liegen. Bei 50% ist jedoch ein Sprung auf einen Wert von circa 0.6 zu erkennen. Dies liegt daran, dass ab 50% auf der äußeren Ellipse mehr Punkte liegen, als auf der inneren. Bei einer zufälligen Auswahl ist es wahrscheinlicher einen Punkt der äußeren Ellipse zu erhalten. Die Koeffizienten der Schätzung mittels der Methode der kleinsten Quadrate verhalten sich ähnlich wie im Fall der gleichverteilten Ausreißer. Würde man den Ausreißeranteil weiter erhöhen, würde der Dice-Koeffizient hier gegen den gleichen Wert wie bei RANSAC konvergieren. Der Wert ist durch die Entfernung der äußeren Ellipse zur inneren Ellipse definiert. Erhöht man diesen, verringert sich der erreichte Dice-Koeffizient.

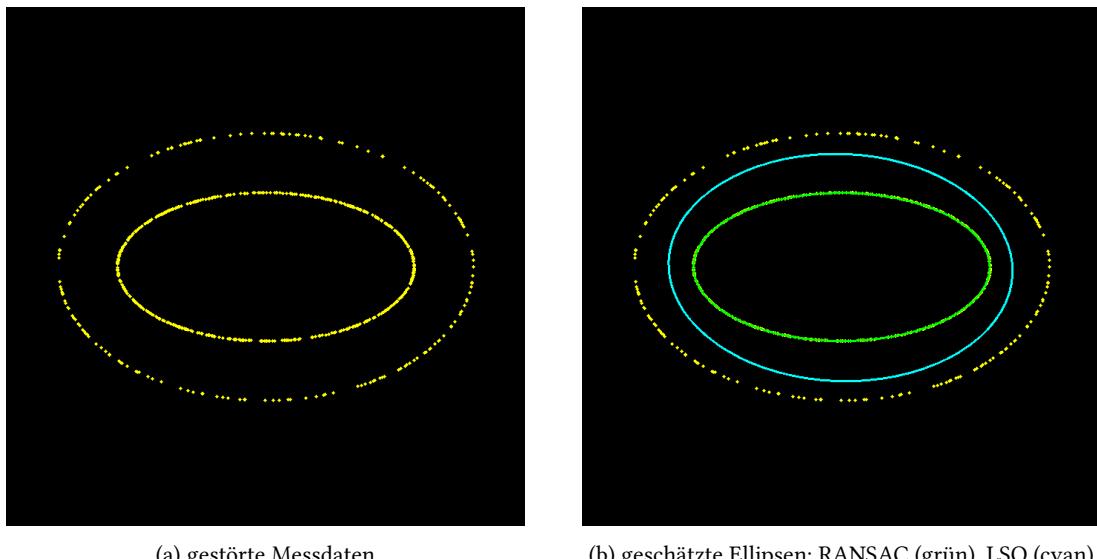


Abbildung 5.13.: Vergleich RANSAC und LSQ bei Ausreißern auf einer äußeren Ellipse mit $p = 0.99$ und $\epsilon = 0.33$

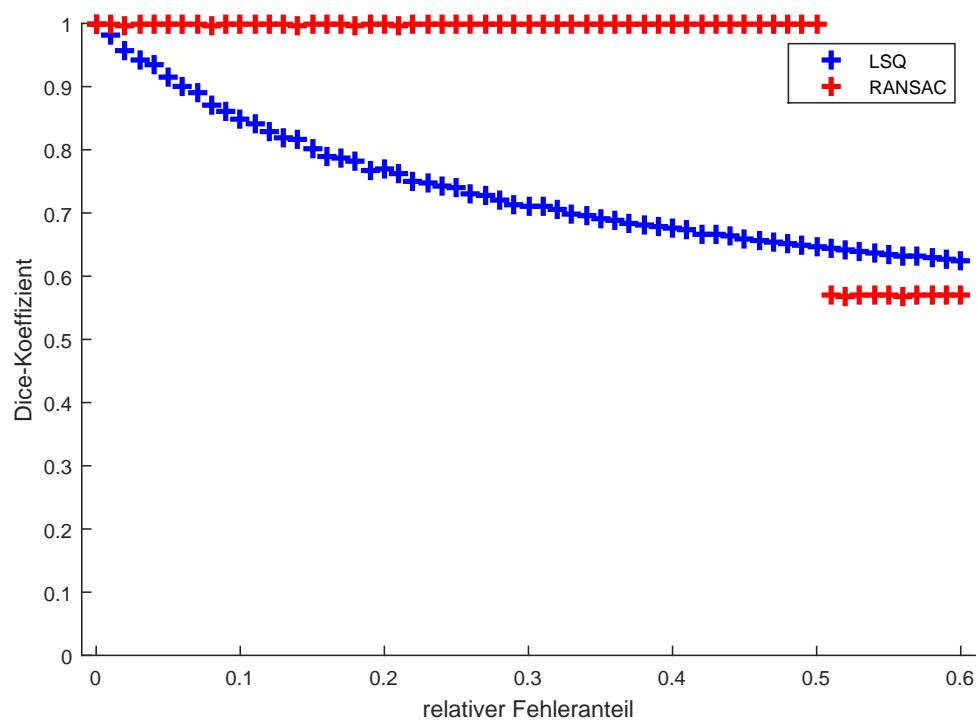


Abbildung 5.14.: Dice-Koeffizienten bei einer Schätzung mittels RANSAC und der Methode der kleinsten Quadrate (LSQ) bei Ausreißern auf einer äußeren Ellipse

6. Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei Verfahren vorgestellt, mit denen Kegeloberflächen anhand eines Kalibrierungsmusters entzerrt werden können, sodass die relative Vergleichbarkeit der Larven gewährleistet ist.

Der Vorteil der Rückwärtsentfaltung gegenüber der Vorwärtsentfaltung ist die Abwesenheit von Defekten. Diese lieferte darüber hinaus auch bei starken Abweichungen der Kamera vom Lot gute Ergebnisse und bei einer Ausgabeauflösung der Seitenhöhe bis zu 850 Pixel sogar eine bessere Laufzeit.

An dieser Stelle soll ein Ausblick auf mögliche Verbesserungsvorschläge für die verwendeten Verfahren gegeben werden.

6.1. Parallelisierung

Da der Kalibrierungsprozess nur ein Mal vor der eigentlichen Entzerrung durchgeführt wird, bietet sich eine Parallelisierung hier nur bedingt an. Dennoch könnte hier besonders bei den komplexeren Aufgaben, wie der Liniendetektion und anschließenden Schnittpunktberechnung, sowie der Ellipsendetektion auf parallele Methoden zurückgegriffen werden. Für eine parallele Implementierung der Hough-Transformation sei auf die Arbeit von Havel [Hav+14] verwiesen. Bei der Ellipsendetektion mittels RANSAC werden für eine vorher definierte Anzahl an Iterationen wiederholt Punkte ausgewählt, mit denen anschließend eine Ellipse geschätzt wird. Es bietet sich hier an, mehrere Gruppen von Punkten parallel zu verarbeiten.

Von größerer Bedeutung ist eine Laufzeitverbesserung der Entzerrung. Nach der Bestimmung der Abbildungsmatrizen wird, nach dem in Kapitel 4 beschriebenen Schema, eine Reihe von Bildern entzerrt. Um die aufgenommenen Bilder nicht zwischenspeichern zu müssen, wäre eine echtzeitfähige Entfaltung wünschenswert. Die Bilder könnten somit direkt entzerrt gespeichert werden. Um die Laufzeit der Entfaltung zu verbessern, könnten beispielsweise parallel mehrere Blöcke von Pixeln gleichzeitig verarbeitet werden.

6.2. Verbesserung der Linien-Detektion

Die Linien-Detektion basiert auf der Hough-Transformation und funktioniert nur mit relativ homogenen Hintergründen. Darüber hinaus werden durch den aktuellen Ansatz sehr viele Linien detektiert, wobei anschließend die Schnittpunkte zwischen all diesen Kandidaten bestimmt werden müssen. Ein besserer

Ansatz wäre, die Gradientenrichtung des Kantenbilds miteinzubeziehen. Dies reduziert die Anzahl falscher Votes und verbessert darüber hinaus die Laufzeit [OC76].

6.3. Verbesserung der Vorwärtsentfaltung

Das Hauptproblem der Vorwärtsentfaltung sind die Defekte auf dem entfalteten Bild. Man könnte mit Hilfe einer Delaunay-Triangulierung versuchen die Defekte zu beheben. Die auf die Mantelfläche abgebildeten Punkte werden bei diesem Verfahren nicht gerundet. Anschließend werden die Punkte trianguliert. Es entstehen Dreiecksnetze, wie beispielhaft in Abbildung 6.1 zu sehen sind. Zum Zwecke der Veranschaulichung wurde hierbei nur ein Teil der Daten benutzt. Mit Hilfe dieser Dreiecke wird nun das Ergebnisbild abgetastet, das heißt für jedes Pixel auf dem entzerrten Bild wird untersucht in welchem Dreieck es sich befindet und dann die Farbe des Pixels mittels baryzentrischer Interpolation aus den drei umgebenden Punkten bestimmt. Die Delaunay-Triangulierung ist jedoch relativ aufwändig mit einer Laufzeit von $O(p \log p)$ für p Punkte [SD95]. Sie richtet sich bei einer konstanten Eingabeauflösung nach der Gesamtanzahl der Pixel im Kalibrierungskegel. Anschließend muss für jedes Pixel auf dem Ausgabebild eine Interpolation (pro Pixel konstanter Aufwand) durchgeführt werden. Die Laufzeit der Vorwärtsentfaltung wird somit quadratisch mit einer großen additiven Konstante bedingt durch die Triangulierung.

6.4. Verbesserung der Rückwärtsentfaltung

Aktuell wird die Projektionsmatrix bei der Rückwärtsentfaltung durch Direct Linear Transformation bestimmt. Dieses Verfahren minimiert jedoch nicht den Reprojektionsfehler. Besser wäre hier deshalb ein iteratives Verfahren, wie der Levenberg–Marquardt Algorithmus (konkret für Projektionsmatrizen beschrieben in [HZ03]). Im Gegensatz dazu könnte auch ein RANSAC-Ansatz verwendet werden. Statt eine optimale Lösung für alle detektierten Samples zu bestimmen, berechnet man wiederholt für sechs Punkte¹ eine Projektionsmatrix. Es wird dann der Reprojektionsfehler für alle anderen Punkte untersucht und schließlich die Projektionsmatrix mit dem größten Consensus Set ausgewählt.

6.5. Verbesserung der Ellipsendetektion mittels Deformable Templates

Die Minimierung der konstruierten Energiefunktion wird stark durch wenig ausgeprägte lokale Minima erschwert. Ein Umformulieren der Energiefunktion könnte hier Abhilfe schaffen. Außerdem hängt das Ergebnis des Verfahrens, wie bei allen iterativen Ansätzen, stark vom gewählten Initialwert (beziehungsweise Initialellipse) ab. Wird, wie in Kapitel 3 beschrieben, eine möglichst große Ellipse als Initialwert gewählt, so kann es passieren, dass diese nicht gegen die äußerste Ellipse konvergiert. Ein inhomogener Hintergrund

¹sechs Punkte sind mindestens notwendig um eine Projektionsmatrix bestimmen zu können, da es elf unbekannte gibt (siehe Kapitel 2.3).

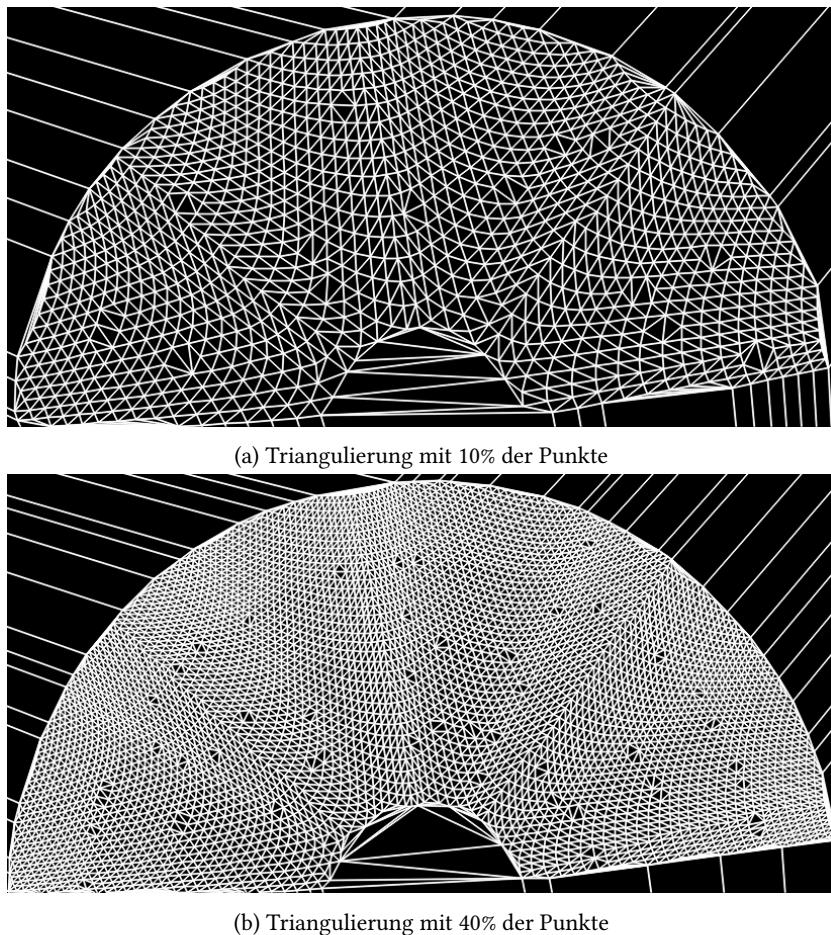


Abbildung 6.1.: Delaunay-Triangulierung

oder ein Schatten des Kalibrierungsmusters können für ein nicht stark ausgeprägtes Minimum in der Energiefunktion sorgen, sodass das Verfahren in einem Iterationsschritt hängen bleibt. Stattdessen könnte als Initialwert eine möglichst kleine Ellipse gewählt werden. Der Term der Energiefunktion, der die Größe beeinflusst, wird dabei umformuliert, sodass die Ellipse wächst, statt zu schrumpfen. Darüber hinaus müsste genau untersucht werden, wie die Einflussparameter α , β und γ eingestellt werden müssen, um zuverlässige Ergebnisse zu liefern.

A. Inhalt der CD

Auf der beiliegenden CD befinden sich folgende Ordner:

1. Blender (enthält Kegel mit Muster, sowie beide Versuchsaufbauten aus der Einleitung)
2. CAD (enthält das parametrisierbare Kalibrierungsmuster in FreeCAD¹)
3. Bilder (enthält die generierten Bilder mittels Blender, die Bilder mit Weitwinkelkamera und Bilder mit normaler Kamera)
4. Daten (CSV-Dateien der Ergebnisse aus Kapitel 5)
5. Latex (\LaTeX -Dateien dieser Arbeit)
6. Matlab (Deformable Templates und Skripte zum Zeichnen der Ergebnisse)
7. Qt (GUI- und Konsolenanwendung)

¹FreeCAD (Version 0.16), *Jürgen Riegel, Werner Mayer, Yorik van Havre*, www.freecadweb.org

Abbildungsverzeichnis

1.1.	beide Ansätze im Vergleich	1
2.1.	gerader Kreiskegel	4
2.2.	Kegelstumpf und Ergänzungskegel	4
2.3.	Kegelstumpf	5
2.4.	Kegelmantelfläche	6
2.5.	Lochkameramodell	10
2.6.	Linsenverzerrungen	12
2.7.	Ellipse mit Brennpunkten f_1/f_2 , Zentrum C , Hauptachse a , Nebenachse b und Scheitelpunkten V_1/V_3 und V_2/V_4	14
2.8.	Ellipse mit Zentrum (x_0, y_0) , Hauptachse a , Nebenachse b , sowie Drehwinkel θ	15
2.9.	Ellipsausschnitt im ersten Quadranten mit Abfragepunkt Q und eingezeichneter kürzester Distanz zum Ellipsenpunkt E	19
3.1.	Kalibrierungsmuster von oben mit $n = 5, m = 6$	24
3.2.	Kalibrierungsmuster entfaltet mit $n = 5, m = 6$	24
3.3.	Kamerakalibrierung	25
3.4.	Kreislinien und Liniensegmente berühren das Sample nicht.	26
3.5.	detektierte Samples	26
3.6.	Canny-Kantendetektion	27
3.7.	Hough-Transformation zur Linien-Detektion und bestimmter Schnittpunkt	28
3.8.	Ellipsendetektion: bestimmte Pixel-Positionen und Aussendepunkt	28
3.9.	Ellipsendetektion bei Ausreißern	29
3.10.	detektierte Ellipsen	30
3.11.	Winkel der Samples zum bestimmen Zentrum	32
3.12.	Zuordnung von Punkten zu Ellipsen und Liniensegmenten	32
3.13.	Interpolation der 3D-Koordinaten mittels vier Sample-Nachbarn	35
3.14.	Vorwärtsentfaltung	36
3.15.	Rückwärtsentfaltung	36
4.1.	Kalibrierungsassistent: intrinsische Kamerakalibrierung	37
4.2.	Kalibrierungsassistent: Kegelkalibrierung	38
5.1.	interpolierter Kegel	42
5.2.	Vorwärtsentfaltung	42

5.3.	Einfluss der Ausgabeauflösung auf die Anzahl der Defekte	43
5.4.	Größe des Ausgabebildes bei einer Seitenhöhe von $ress$	44
5.5.	Laufzeitvergleich zwischen Vorwärtsentfaltung und Rückwärtsentfaltung	45
5.6.	Einfluss der intrinsischen Kalibrierung auf den Reprojektionsfehler	46
5.7.	gerendeter Kegel mit Kalibrierungsmuster aus verschiedenen Blickrichtungen	46
5.8.	Einfluss der Rotation der Kamera auf den Reprojektionsfehler	47
5.9.	Einfluss der Ausgabeauflösung auf die Laufzeit der Entfaltung	48
5.10.	Deformable Templates: Ausschnitt der Energiefunktion für variable Haupt- und Nebenachse	49
5.11.	Vergleich RANSAC und LSQ bei gleichverteilten Ausreißern $\epsilon = 0.5, p = 0.99$	49
5.12.	Dice-Koeffizienten bei einer Schätzung mittels RANSAC und der Methode der kleinsten Quadrate (LSQ) bei gleichverteilten Ausreißern	50
5.13.	Vergleich RANSAC und LSQ bei Ausreißern auf einer äußeren Ellipse mit $p = 0.99$ und $\epsilon = 0.33$	51
5.14.	Dice-Koeffizienten bei einer Schätzung mittels RANSAC und der Methode der kleinsten Quadrate (LSQ) bei Ausreißern auf einer äußeren Ellipse	52
6.1.	Delaunay-Triangulierung	55

Literatur

- [Bos06] Siegfried Bosch. *Lineare Algebra*. 2006 (siehe S. 16).
- [Can86] J Canny. „A Computational Approach to Edge Detection“. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 8.6 (1986), S. 679–698 (siehe S. 13, 27).
- [Dic45] Lee Raymond Dice. „Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species“. In: *Ecological Society of America* 26.3 (1945), S. 297–302 (siehe S. 49).
- [Ebe08] David Eberly. „The Area of Intersecting Ellipses“. In: *Geometric Tools, LLC* (2008) (siehe S. 50).
- [Ebe13] David Eberly. „Distance from a Point to an Ellipse, an Ellipsoid, or a Hyperellipsoid“. In: *Geometric Tools, LLC* (2013), S. 1–13 (siehe S. 18, 21).
- [FB81] Martin A. Fischler und Robert C. Bolles. „Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography“. In: *Commun. ACM* 24.6 (1981), S. 381–395 (siehe S. 13, 14).
- [Hav+14] Jiří Havel u. a. „Real-time detection of lines using parallel coordinates and CUDA“. In: *Journal of Real-Time Image Processing* 9.1 (2014), S. 205–216 (siehe S. 53).
- [HS97] Janne Heikkilä und Olli Silvén. „A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction“. In: *Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97)*. CVPR '97. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1997, S. 1106– (siehe S. 10, 12).
- [HZ03] Richard Hartley und Andrew Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2. Aufl. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2003 (siehe S. 54).
- [Jam92] R C James. *Mathematics Dictionary*. 5. Aufl. Springer, 1992, S. 74–75 (siehe S. 3, 4).
- [Key81] R. Keys. „Cubic convolution interpolation for digital image processing“. In: *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on* 29.6 (1981), S. 1153–1160 (siehe S. 47).
- [Law72] J D Lawrence. *A Catalog of Special Plane Curves*. Dover Publications, 1972, S. 62–63 (siehe S. 16–18).
- [Lin93] Tony Lindeberg. „Detecting Salient Blob-like Image Structures and Their Scales with a Scale-space Primal Sketch: A Method for Focus-of-attention“. In: *International Journal of Computer Vision* 11.3 (1993), S. 283–318 (siehe S. 12).
- [OC76] F. O’Gorman und M. B. Clowes. „Finding Picture Edges Through Collinearity of Feature Points“. In: *IEEE Transactions on Computers* 25.4 (1976), S. 449–456 (siehe S. 54).
- [SD95] Peter Su und Robert L. Scot Drysdale. „A Comparison of Sequential Delaunay Triangulation Algorithms“. In: *Proceedings of the Eleventh Annual Symposium on Computational Geometry*. SCG '95. Vancouver, British Columbia, Canada: ACM, 1995, S. 61–70 (siehe S. 54).
- [Sto07] Burlisch Stoer. *Numerische Mathematik 1*. Springer, 2007, S. 249–253 (siehe S. 8).
- [Sto11] Burlisch Stoer. *Numerische Mathematik 2*. Springer, 2011, S. 21–23 (siehe S. 9).

- [Tsa87] Roger Y. Tsai. „Radiometry“. In: USA: Jones und Bartlett Publishers, Inc., 1987. Kap. A Versatile Camera Calibration Technique for High-accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses, S. 323–344 (siehe S. 10).
- [YHC92] Alan L. Yuille, Peter W. Hallinan und David S. Cohen. „Feature Extraction from Faces Using Deformable Templates“. In: *Int. J. Comput. Vision* 8.2 (1992), S. 99–111 (siehe S. 22).
- [Zha00] Zhengyou Zhang. „A Flexible New Technique for Camera Calibration“. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 22.11 (2000), S. 1330–1334 (siehe S. 11).

Plagiatserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über

Entzerrung von Kegeloberflächen aus einer Einkameraansicht basierend auf projektiver Geometrie

selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

Lars Haalck, Münster, 29. September 2016

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in eine Datenbank einverstanden.

Lars Haalck, Münster, 29. September 2016