Seminararbeit zur Projektgruppe CSI:PC^2
Iriserkennung - Der Vergleichstest für den Iriscode

Nils Timm

31. Mai 2007

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

1 Einleitung

Die Iriserkennung ist ein biometrisches Verfahren, bei dem die Authentifizierung oder Identifizierung von Personen anhand ihres Irismusters stattfindet. In vielerlei Hinsicht hat sich die Iriserkennung als gute Alternative zu anderen Personenerkennungsverfahren erwiesen. Zu den wichtigsten Vorteilen gehören die enorme Mustervariabilität zwischen verschiedenen Personen, die lebenslange Stabilität des Irismusters und die guten Möglichkeiten Angriffe durch gefälschte Irismuster abzuwehren. Das derzeit verbreitetste Verfahren zur Iriserkennung beruht auf den Algorithmen von John Daugman. Dabei wird aus der Aufnahme eines Irismusters der so genannte Iriscode generiert. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Vergleichstest, mit dem Iriscode-Paare auf Übereinstimmung geprüft werden.

Dazu wird im nachfolgenden Abschnitt Daugmans Verfahren zur Iriserkennung grundlegend vorgestellt und es werden die wichtigsten Eigenschaften des Iriscodes beschrieben.

Der Abschnitt 3 stellt den Iriscode-Vergleichstest, der im Wesentlichen auf der Berechnung der Hamming-Distanz eines Iris-Paares beruht, eingehend vor.

Im 4. Abschnitt wird dann aufgezeigt, welche Resultate der Vergleichstest in einem umfassenden Feldversuch lieferte und welche statistischen Aussagen sich über die Verteilung der Versuchsergebnisse treffen lassen.

Der anschließende Abschnitt beschreibt ein formales statistisches Modell für die Verteilung von Hamming-Distanzen verschiedener Irise. Ferner wird die Gültigkeit des Modells gezeigt und beschrieben, wie sich Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten konkreter Hamming-Distanzen anhand des Modells bestimmen lassen.

In Abschnitt 6 wird darauf eingegangen, wie sich bei der Iriserkennung Invarianz bezüglich unterschiedlicher Gegebenheiten bei der Iris-Aufnahme erreichen lässt. Dementsprechend werden Vergleichstest und statistisches Modell angepasst.

Abschnitt 7 fasst dann die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammen. Der anschließende Ausblick zeigt auf, wie sich auf Grundlage dieser Ergebnisse eine Entscheidungsumgebung für die Iriserkennung entwickeln lässt und welche weiteren Faktoren dabei noch berücksichtigt werden müssen.

2 Grundlagen

Nahezu alle derzeit kommerziell eingesetzten Systeme zur Iriserkennung verwenden ein Verfahren des Mathematikers John Daugman. Dieses wurde 1993 erstmals veröffentlicht und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt. Lizenznehmer, wie British Telecom, US Sandia Labs, IBM, NCR sowie sämtliche internationale Flughäfen berichten von einer Fehlübereinstimmungsquote von Null in allen Prüfungen.
Daugmans Algorithmus beruht auf der Erzeugung des so genannten Iriscodes. Dazu wird zunächst die Iris innerhalb einer Abbildung aufgesucht indem die Pupillenbegrenzung sowie die äußere Begrenzung festgestellt werden. Man erhält so ein isoliertes Irismuster. Dieses wird in ein dimensionsloses Polarkoordinatensystem abgebildet. Die Irismerkmale werden mittels der so genannten Wavelet-Demodulation phasenkodiert und man erhält einen 2048 Bit Iriscode-Vektor, der das Muster der Iris repräsentiert. Des Weiteren werden zu jeder Iris ebenso viele Maskierungsbits berechnet. Diese geben an, ob eine Irisregion bei der Aufnahme möglicherweise verdeckt wurde. Dies ist notwendig, um solche Bereiche bei der Überprüfung auf Übereinstimmung zweier Irismuster ausschließen zu können. Zu Verdeckungen kann es beispielsweise durch Wimpern, Augenlider, Ränder von Kontaktlinsen oder Glanzlichtreflexionen kommen [DAUGMAN, 1993], [ROTH, 2001], [WAYMAN, 2005].
Iriscode und Maskenvektor bilden die Grundlage für den Vergleichstest, anhand dessen entschieden werden soll, ob zwei Irismuster übereinstimmen oder nicht. Daugmans Vergleichstest für den Iriscode soll im Rahmen dieser Arbeit eingehend erläutert werden. Dazu werden auch Resultate des Tests im Praxiseinsatz, sowie daraus ableitbare statistische Eigenschaften betrachtet.

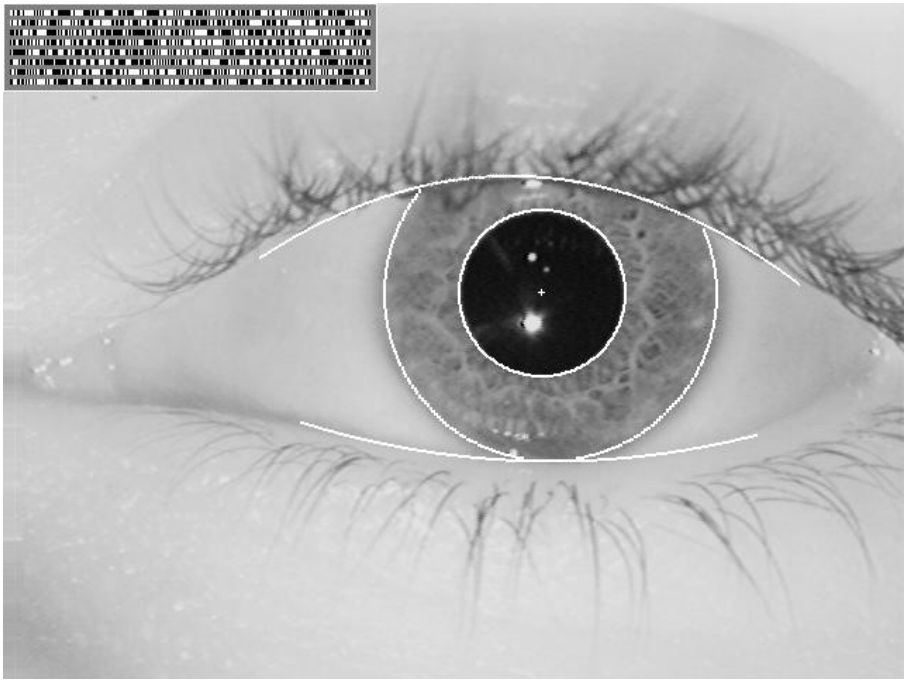

Abbildung 1: Eine Iris mit dem dazu generierten Iriscode

3 Der Vergleichstest

Daugmans Algorithmus erzeugt aus einer gescannten Iris den so genannten Iriscode, einen Bitvekor, der das Irismuster beschreibt, sowie einen dazugehörigen Maskenvektor, der die unverdeckten und somit verwertbaren Bereiche der Iris angibt. Die Entscheidung, ob zwei Irismuster übereinstimmen oder nicht, wird durch die Prüfung auf statistische Unabhängigkeit der Iriscodes getroffen. Dazu wird das jeweilige Iriscode-Paar einem Vergleichstest unterzogen, der die Hamming- Distanz der beiden Vektoren bestimmt. Die Hamming-Distanz ist ein Maß für die Unterschiedlichkeit von Zeichenketten, sie wird für den Irisvergleich durch folgende Formel berechnet.

$$HD = \frac{\|(CodeA \otimes CodeB) \wedge MaskA \wedge MaskB\|}{\|MaskA \wedge MaskB\|}$$

$CodeA$ und $CodeB$ sind hierbei die Iriscode-Vektoren zu jeweils einem Irismuster A und B. Die Verknüpfung mit dem Exklusiv-Oder-Operator liefert die nicht übereinstimmenden Bitstellen der beiden Iriscodes. Der daraus resultierende Vektor wird mit den zugehörigen Maskenvektoren $MaskA$, beziehungsweise $MaskB$ Und-verknüpft, so dass nur solche Bitstellen dem Vergleich unterzogen werden, die nicht durch Verdeckungen oder sonstige Störungen ungültig sind. Durch die Normen ($\|...\|$) erhält man im Zähler die Anzahl nicht übereinstimmender Bits im gültigen Bereich. Der Nenner gibt die Gesamtanzahl gültiger Bits an. So erhält man insgesamt den Anteil nicht übereinstimmender Bits unter Ausschluss von Störungen und somit die Unähnlichkeit der beiden verglichenen Irismuster. Ein Wert von 0 entspräche einer perfekten Übereinstimmung, ein Wert von 1 würde die völlige Unterschiedlichkeit der Muster bedeuten [DAUGMAN, 2003].
Der Vergleichstest ist realisiert durch die einfachen booleschen Operatoren XOR und AND, diese lassen sich auf Hardware-Ebene durch Maschineninstruktionen eines Mikroprozessors effizient implementieren. Bei der Verwendung eines 300-MHz-Mikroprozessors erreichte Daugman 100 000 Irismustervergleiche pro Sekunde. Zudem ist es bei der Durchmusterung großer Datenbanken möglich, die Vergleiche parallel für mehrere Datenbankblöcke durchzuführen. Neben der Zeiteffizienz ist es aber vor allem entscheidend, welche Resultate der Vergleichstest in der Praxis liefert. Dazu beschreibt der nachfolgende Abschnitt einen Feldversuch, bei dem für mehrere Milliarden Irismuster-Paare die Hamming-Distanzen berechnet wurden.

4 Der Test im Feldversuch

In einem Feldversuch von John Daugman wurden für 200 Milliarden Iris-Paare die Hamming-Distanzen der zugehörigen Iriscodes berechnet. Verglichen wurden hierbei nur Irismuster, die von unterschiedlichen Irisen stammten. Es gab somit keine Vergleiche von Iriscode Paaren, die zur selben Iris gehörten und für die zweimal unabhängig ein Iriscode generiert wurde.
Als Vorüberlegung lassen sich anhand der kombinatorischen Eigenschaften des Iriscodes Vermutungen über die Resultate des Feldversuchs anstellen. Der Iriscode ist so aufgebaut, dass jedes Bit mit gleicher Wahrscheinlichkeit den Wert 0 oder 1 hat. Zudem gibt es zwischen den Mustern unterschiedlicher Irise keine Korrelationen. Da in der Versuchsreihe nur verschiedene Irismuster verglichen wurden, ergibt sich somit für die Hamming-Distanz eines Paares ein Erwartungswert von 0.5. Tatsächlich zeigten sich in dem Feldversuch Resultate, die diese Vermutungen bestätigen. Als HD-Mittelwert ergab sich $p = 0.499$, die Standartabweichung lag bei $\sigma = 0.034$. Abbildung 2 zeigt die Verteilung der Hamming-Distanzen im Feldversuch als Balkendiagramm, sowie eine Binomialverteilung mit $p = 0.5$ und $N = p(1-p)/\sigma^2 = 249$ Freiheitsgraden als durchgezogene Kurve. Die beiden Verteilungen stimmen nahezu perfekt überein. Der Vergleichstest zweier verschiedener Irismuster entspricht also einem Bernoulli-Experiment mit 249 Münzwürfen. Die Tatsache, dass die Verteilung nur einen Freiheitsgrad von 249 aufweist, obwohl der Iriscode aus einem 2048 Bit großem Vektor besteht, ist darauf zurückzuführen, dass bei Irismustern interne Korrelationen bestehen. So sind insgesamt 249 Bitteilmengen des Iriscodes gegenseitig unabhängig [DAUGMAN, 2006].
Der Feldversuch hat also ergeben, dass die Verteilung der Hamming-Distanzen verschiedener Irismuster einer Binomialverteilung mit 249 Freiheitsgraden entspricht. Auf dieser Grundlage wird im nachfolgenden Abschnitt ein statistisches Modell für den Irisvergleich aufgestellt und dessen Gültigkeit gezeigt.

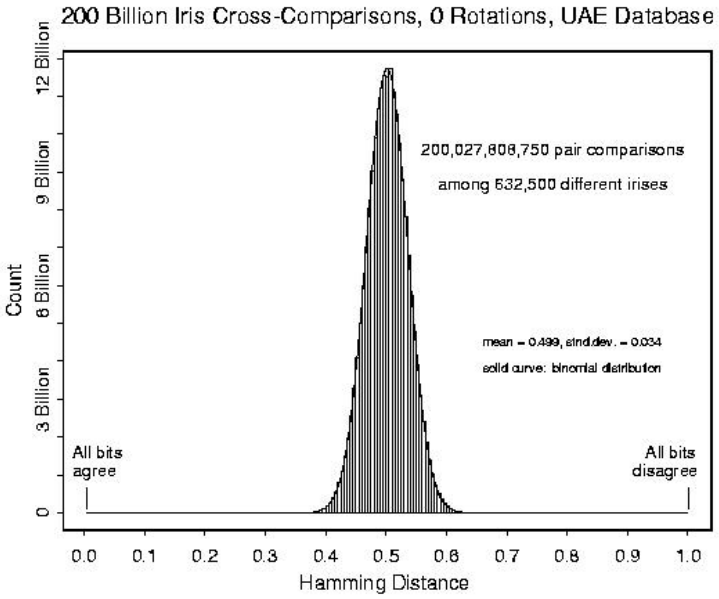

Abbildung 2: Binomialverteilung der Iriscode-Hamming Distanz

5 Statistisches Modell

Die durchgezogene Kurve der Binomialverteilung in Abbildung 2 ergibt sich aus der folgenden Funktion:

$$f(x) = \frac{N!}{m!(N-m)!} p^m (1-p)^{(N-m)}$$

Die hierbei auftretenden Parameter sind

- die Wahrscheinlichkeit des günstigen Ergebnisses eines Einzelversuchs $p = 0.5$,
- die Zahl der gesamten Versuche $N = 249$
- und die Zahl der erfolgreichen Versuche m.

In Bezug auf die Iriserkennung entspricht m also der Anzahl Bits, die beim Vergleich von zwei unterschiedlichen Irismustern nicht übereinstimmen. Die Funktion ist abhängig von der Variable $x = m/N$, dem Erfolgsanteil der N Versuche. Somit entspricht x der Hamming-Distanz, die sich beim Vergleich zweier Iriscodes ergibt. Berechnet man die Funktion $f(x)$ für einen Wert x, so erhält man die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Vergleichstest der HD-Wert genau x beträgt.
Mit diesem statistischen Modell lassen sich also unter der Annahme, dass die Verteilung von Hamming-Distanzen unterschiedlicher Irismuster einer Binomialverteilung mit 249 Freiheitsgraden entspricht, Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten konkreter Hamming-Distanzen bestimmen. Um jedoch die Gültigkeit dieses Modells zu bestätigen, muss gezeigt werden, dass die sehr genaue Übereinstimmung von theoretisch berechneter Verteilung und den Resultaten des Feldversuchs in mehreren Größenordnungen gilt.
Bildet man die Stammfunktion von $f(x)$ so gibt diese die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer HD $\leq x$ an. Diese Kumulation von $f(x)$ für 0 bis x lässt sich mit den entsprechenden kumulierten Werten der Verteilung des Feldversuchs vergleichen. In Abbildung 3 sind diese Kumulationen in einer quantilweisen Darstellung gegenübergestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Werte aus Theorie und Praxis, wie man an dem linearen Verhältnis erkennen kann. Damit bestätigt sich die Gültigkeit des statistischen Modells. Es lassen sich also auf theoretischem Wege Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Hamming-Distanzen prognostizieren. So lässt sich bestimmen, dass eine Nichtübereinstimmung von weniger als einem Drittel der Bits zweier verschiedener Iriscodes extrem unwahrscheinlich ist. Für einen HD-Wert ≤ 0.300 liegt die errechnete Wahrscheinlichkeit beispielsweise bei 1 zu 10 Milliarden. Die kleinste tatsächlich aufgetretene Hamming-Distanz im Rahmen der 200 Milliarden Vergleichstests des Feldversuchs betrug 0.334 [DAUGMAN, 2004].
Das hergeleitete statistische Modell bietet mit seiner Genauigkeit eine wichtige Grundlage, um einen Schwellwert für die Entscheidungsumgebung einer konkreten Implementierung der Iriserkennung festzulegen. Die Wahl eines Schwellwertes sollte allerdings noch von weiteren Faktoren, wie der HD-Verteilung von Iriscode-Paaren identischer Augen und der Größe der zu durchmusternden Datenbank abhängig sein. Diese Faktoren sind jedoch nicht Thema dieser Arbeit, sie werden allerdings im Ausblick noch einmal aufgegriffen.

Der nächste Abschnitt behandelt Möglichkeiten der Verbesserung der Iriserkennung, die sich u. a. durch Anpassung des Vergleichstests erreichen lassen. Eine Veränderung des Vergleichstests hat auch Konsequenzen für das hier eingeführte statistische Modell, diese werden ebenfalls nachfolgend erläutert.

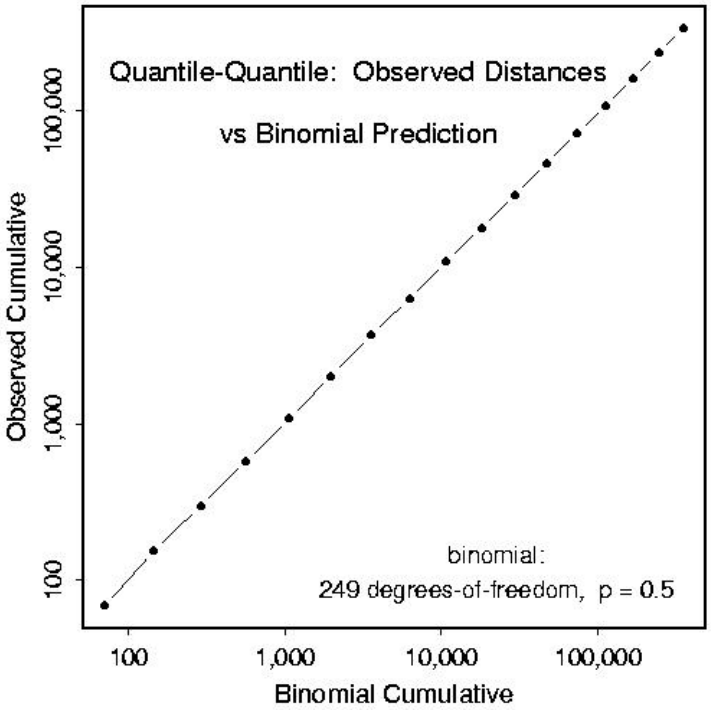

Abbildung 3: Beobachtete und theoretisch binomialverteilte Kumulationen im Vergleich

6 Verbesserung der Iriserkennung

Für eine robuste Iriserkennung ist es notwendig, dass diese invariant gegenüber unterschiedlichen Gegebenheiten bei der Aufnahme der Iris ist. Konkret bedeutet dies, es muss Invarianz vorliegen

1. gegenüber der Abbildungsgröße der gesamten Iris, beziehungsweise dem Abstand zur Kamera bei der Aufnahme,
2. bezüglich der Pupillengröße innerhalb der Iris,
3. gegenüber der vertikalen Drehbewegung des Augapfels,
4. bezüglich des Kamerawinkels bei der Aufnahme,
5. sowie gegenüber der Orientierung der Iris, die sich aus der Kopfneigung ergibt.

Eine invariante Darstellung bezüglich der Punkte 1 bis 4 wird bereits durch den Algorithmus von Daugman zur Iriscode-Generierung gewährleistet, der ein gescanntes Irismuster in ein polares Koordinatensystem abbildet. Für die ersten vier Faktoren ist also keine Anpassung des Vergleichstests notwendig, weshalb hier nicht näher auf diese eingegangen wird.
Punkt 5 wird hingegen nicht durch den Algorithmus abgedeckt. Eine Rotation der Irisabbildung selbst, in eine normierte Position, hat sich als nicht zweckmäßig erwiesen. Eine Orientierungsinvarianz lässt sich jedoch leicht durch die mehrfache Ausführung des Vergleichstests für verschiedene Orientierungen eines Iris-Paares erreichen. Dazu werden für ein Irismuster mehrere Iriscodes generiert, die jeweils das Irismuster in einer anderen Orientierung repräsentieren. Dies geschieht durch die zyklische Weiterschaltung der Winkelvariablen θ, die in Daugmans Algorithmus die Orientierung einer Iris beschreibt. Führt man nun anhand dieser Iriscodes mehrere Vergleichstests pro Iris-Paar durch, erhält man mehrere Hamming-Distanzen, von denen sich die beste Übereinstimmung dem Paar zuordnen lässt. Es wird also der kleinste HD-Wert aus mehreren unabhängigen Versuchen ausgewählt. Dementsprechend lässt sich auch das im vorherigen Abschnitt eingeführte statistische Modell an den mehrfachen Vergleichstest anpassen:

- Verteilungsfunktion für den Einzelvergleichstest zweier verschiedener Irise (Vgl. Abschnitt Statistisches Modell):

$$f_0(x)$$

- Kumulation für $f_0(x)$ von 0 bis x. Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer HD $\leq x$:

$$F_0(x) = \int_0^x f_0(x)dx$$

- Wahrscheinlichkeit für das Nichtauftreten einer HD $\leq x$:

$$1 - F_0(x)$$

- Wahrscheinlichkeit für das Nichtauftreten einer HD $\leq x$ bei n voneinander unabhängigen Vergleichstests für verschiedene Orientierungen:

$$[1 - F_0(x)]^n$$

- Wahrscheinlichkeit für das mindestens einmalige Auftreten einer HD $\leq x$ bei n voneinander unabhängigen Vergleichstests für verschiedene Orientierungen. Bzw. Wahrscheinlichkeit, dass für die beste Übereinstimmung der n Vergleichstests gilt HD $\leq x$:

$$F_n(x) = 1 - [1 - F_0(x)]^n$$

- Neue Verteilungsfunktion für n unabhängige Vergleichstests in verschiedenen Orientierungen beim Vergleich zweier verschiedener Irise:

$$f_n(x) = n f_0(x) \, [1 - F_0(x)]^{n-1}$$

Die Gültigkeit der neu hergeleiteten Verteilungsfunktion ergibt sich wiederum durch einen Vergleich mit Daten aus der Praxis. Dazu wurde der schon beschriebene Feldversuch so angepasst, dass zu jedem Iris-Paar Vergleichstests für 7 verschiedene Orientierungen durchgeführt wurden. Die kleinste der dabei errechneten 7 Hamming-Distanzen wurde jeweils beibehalten.
In Abbildung 4 sind die Verteilungen dieses Feldversuchs und des neu hergeleiteten statistischen Modells mit $n = 7$ zu sehen. Theoretisch berechnete Werte sowie die tatsächlichen Daten stimmen nahezu perfekt überein. Man sieht zudem, dass eine Linksverschiebung der Verteilungen stattgefunden hat, denn es wurde jeweils nur die kleinste Hamming-Distanz aus 7 Tests berücksichtigt. Der neue Mittelwert lag somit bei 0.458. Der kleinste tatsächlich aufgetretene HD-Wert des angepassten Feldversuchs betrug 0.330 [DAUGMAN, 2004]. Damit liegt ein statistisches Modell vor, mit dem sich Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Hamming-Distanzen auch orientierungsinvariant prognostizieren lassen.
Im nachfolgenden Abschnitt werden noch einmal die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Der abschließende Ausblick geht darauf ein, wie sich auf Grundlage des eingeführten statistischen Modells Schwellwerte für eine Entscheidungsumgebung der Iriserkennung festlegen lassen. Zudem wird angesprochen, welche weiteren Faktoren bei dieser Festlegung noch berücksichtigt werden sollten.

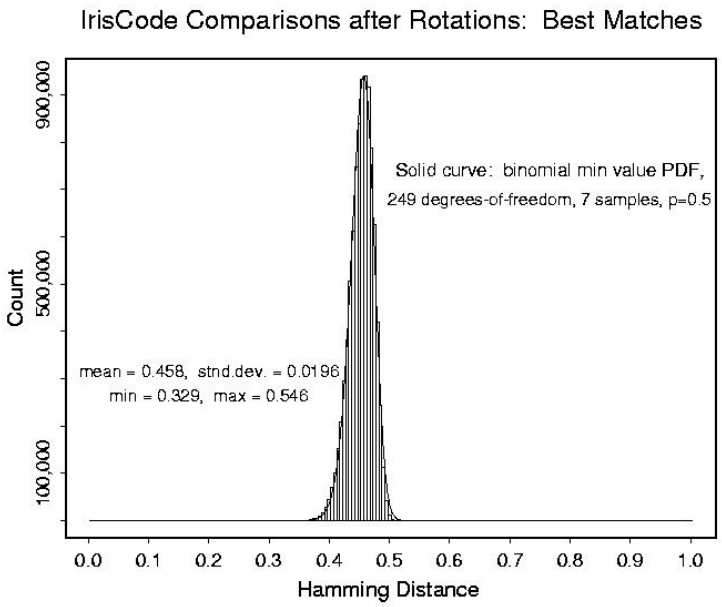

Abbildung 4: Iriscode-Vergleiche nach Rotationen: Beste Übereinstimmungen

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Vergleichstest für den Iriscode zu John Daugmans Verfahren zur Iriserkennung eingehend vorgestellt. Dieser beruht auf der Berechnung der Hamming-Distanz eines Iriscode Paares. Ein Feldversuch mit 200 Milliarden Vergleichen unterschiedlicher Irispaare zeigte die Resultate des Tests in der Praxis. Als Mittelwert für den Grad der Nichtübereinstimmung zweier Iriscodes unterschiedlicher Augen ergab sich 0.5. Eine geringere Hamming-Distanz als 0.33 trat in der gesamten Versuchsreihe nicht auf. Es stellte sich heraus, dass die Verteilung von HD-Werten unterschiedlicher Irise sehr genau einer Binomialverteilung mit 249 Freiheitsgraden entspricht. Auf dieser Grundlage konnte ein statistisches Modell für die Verteilung von Hamming-Distanzen verschiedener Irismuster aufgestellt und auch validiert werden. Da Daugmans Verfahren in den letzen Jahren weiterentwickelt wurde, um Verbesserungen in Bezug auf die Robustheit der Iriserkennung zu erreichen, änderte sich auch die Anzahl an Vergleichstests, die pro Iris-Paar durchzuführen sind. Durch die Berechnung der HD-Werte für verschiedene Rotationen einer Iris ließ sich Orientierungsinvarianz erzielen. Dies wurde ebenfalls in dieser Arbeit näher erläutert, ein erweiterter Feldversuch dazu vorgestellt und das statistische Modell entsprechend angepasst. Dieses Modell bietet nun die Möglichkeit Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Hamming-Distanzen beim Vergleich unterschiedlicher Irismuster theoretisch zu bestimmen. Dies ist wichtig, um für konkrete Implementierungen optimale Schwellwerte für die Entscheidungsumgebung zu finden und so minimale Fehlübereinstimmungsquoten gewährleisten zu können.
Für die Wahl eines optimalen Schwellwertes sollten allerdings auch weitere Faktoren berücksichtigt werden, die nicht im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt wurden. Der nachfolgende Ausblick benennt die Faktoren und zeigt auf, welchen Einfluss diese auf die Entscheidungsumgebung haben.

8 Ausblick

In den bisherigen Betrachtungen wurde nur auf die HD-Verteilung verschiedener Irise eingegangen. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen ist es möglich, die Wahrscheinlichkeiten einer fälschlichen Übereinstimmung in Abhängigkeit eines HD-Schwellwertes zu bestimmen. Für eine Entscheidungsumgebung ist es aber auch notwendig, die Wahrscheinlichkeiten einer Nichterkennung identischer Irise zu berücksichtigen. Diese Wahrscheinlichkeiten ergeben sich aus der Verteilung der Hamming-Distanzen gleicher Augen. Mit der Wahl einer konkreten Akzeptanzschwelle sind also eine Falschübereinstimmungsrate und eine Nichterkennungsrate verbunden. Je nach konkretem Anwendungsgebiet einer Iriserkennung können entweder Nichterkennung oder Falschübereinstimmung die schwerwiegenderen Konsequenzen haben.
Auch sollte die Größe der zu durchsuchenden Datenbank für die Wahl eines Schwellwertes berücksichtigt werden. Die mittels Binomialfunktion berechenbaren Wahrscheinlichkeiten einer Falschübereinstimmung betreffen einen einzelnen Vergleichstest. Bei der Durchmusterung einer Datenbank mit N Einträgen werden N Vergleichstests durchgeführt und die Wahrscheinlichkeit für einen dabei auftretenden Fehler steigt somit exponentiell.
Die hier angesprochenen Faktoren HD-Verteilung gleicher Irise und die Größe einer zu durchmusternden Datenbank sowie ihre Konsequenzen für die Wahl einer optimalen Akzeptanzschwelle werden in der Seminararbeit von Andre Ückermann eingehend behandelt.

Literatur

[DAUGMAN, 1993] Daugman, John: High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 15, 1993

[DAUGMAN, 2003] Daugman, John: The importance of being random: Statistical principles of iris recognition. Pattern Recognition, vol. 36, 2003

[DAUGMAN, 2004] Daugman, John: How Iris Recognition Works. IEEE Trans. CSVT 14(1), 2004

[DAUGMAN, 2006] Daugman, John: Probing the uniqueness and randomness of IrisCodes: Results from 200 billion iris pair comparisons. Proceedings of the IEEE, vol. 94, 2006

[ROTH, 2001] Roth, Richard, et al.: Biometrische Identifikation. Vieweg, 2001

[WAYMAN, 2005] Wayman, James, et al.: Biometric Systems. Springer, 2005