Vollständige Mittelachsenbeschreibung binärer Bildstrukturen mit euklidischer Metrik und korrekter Topologie

Author(s):
Klein, Fernand

Publication Date:
1987

Permanent Link:
https://doi.org/10.3929/ethz-a-000471761 →

Diss. ETH Nr. 8411

VOLLSTÄNDIGE MITTELACHSENBESCHREIBUNG BINÄRER BILDSTRUKTUREN MIT EUKLIDISCHER METRIK UND KORREKTER TOPOLOGIE

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels eines
Doktors der Technischen Wissenschaften
der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

FERNAND KLEIN

dipl. El.Ing. ETH
geboren am 29. November 1957
von Luxemburg

O. Kübler

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. O. Kübler, Referent
Dr. E. Hundt, Korreferent

Zürich, 1987

Zusammenfassung

Geometrisch-relationale Beschreibungen von zweidimensionalen Formen stossen unverändert auf starkes Interesse seit den frühen Anfängen der Mustererkennung. Ihr populärster Vertreter ist zweifellos die Darstellung eines Objektes mittels der flächenlosen Mittelachsenstruktur, sprich: Skelett, seines Schattenbildes. Die relationale Komponente besteht in einem Graphen, der den Zusammenhang der einzelnen Skelettäste abstrakt wiedergibt; aus den Achsenverläufen und der örtlichen Ausdehnung entlang der Achsen lassen sich problemspezifische, geometrische Merkmale ableiten.

Eine solche Beschreibung eignet sich auf natürliche Weise für verhältnismässig dünne Bildstrukturen, wie sie typischerweise in Graphiken anzutreffen sind. Diese lassen sich durch kontrolliertes, iteratives Abtragen des Randes auf ihre Längsachsen reduzieren, ohne dass ursprünglich zusammenhängende Bestandteile auseinanderbrechen. Kapitel 1 fasst die entsprechenden Grundlagen der Verdünnung und Überführung der verdünnten Strukturen aus der Rasterform in die gewünschte geometrisch-relationale Darstellung zusammen; die Raster-Vektor-Konversion wird verallgemeinert für vergleichbare Problemstellungen.

Bei dünnem Bildinhalt ist die flächige Ausdehnung generell ohne Belang; bei der Erfassung von allgemeinen Formen hingegen bildet diese geometrische Eigenschaft einen wesentlichen Bestandteil der Beschreibung. Um die Invarianz der Darstellung bezüglich Drehungen zu gewährleisten, muss die örtliche Breite euklidisch gemessen werden. Im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht die Berechenbarkeit einer diskreten, möglichst invarianten Mittelachsendarstellung (Kapitel 2 und 3); in der Tat ist das Skelettkonzept, obwohl klar definiert im Kontinuum, bis dato nicht systematisch untersucht worden hinsichtlich seiner diskreten Realisierbarkeit sowie seiner Eignung für digitale Mustererkennung.

Existierende, diskrete Verfahren (Kapitel 2) bestimmen generell die lokale Ausdehnung der Objektfläche durch Messen des kürzesten Abstandes von jedem Objektpunkt zum Hintergrund (Distanztransformation); die Dicke als Funktion des Ortes wird in Form einer diskreten Distanzkarte aufgehoben. Dabei werden im Sinne effizienter Auswertung nicht-euklidische Metriken verwendet oder aber nicht-metrische Näherungsfunktionen berechnet. Der euklidische Grenzfall lässt sich aber mit den vorgeschlagenen

Verfahren nicht unmittelbar realisieren; deshalb wird ein neuer, vektorbasierter, sequentieller Algorithmus vorgeschlagen, der eine exakte, euklidische Distanzkarte erstellt.

Anhand der Distanzkarte werden diskrete Skelettpunkte ausgezeichnet, die bestimmte, spezifische Eigenschaften besitzen. Gängige Verfahren unterscheiden sich grundsätzlich bezüglich der verwendeten Mittelachsenkriterien und erzeugen somit, infolge der Nichtäquivalenz derselben in der diskreten Ebene, verschiedene Resultate. So führt die Auszeichnung von Punkten mit maximalem Abstand zur Kontur im euklidischen Grenzfall zu unrealistischen Berechnungszeiten und unbrauchbaren Skeletten; die Ermittlung von Skelettpunkten als Zentren von grösstmöglichen, einbeschreibbaren Scheiben erfordert einen aufwendigen, diskreten Beinhaltungstest und infolgedessen eine zusätzliche, lokale Vorverarbeitung; lokale, differentialgeometrische Ansätze schliesslich sind erfreulich effizient, gewährleisten aber i.a. keine Vollständigkeit der Beschreibung und erzeugen zudem künstliche Skelettäste, die sich allerdings mittels ebenfalls lokalen Operationen eliminieren lassen.

Die rein diskrete Ermittlung von Skelettpunkten mittels der angeführten, verbesserten Verfahren führt zu einer unvollständigen Achsenstruktur; somit sind zusätzliche Punkte in Form von Sattelpunkten in der Distanzkarte zu bestimmen; Kriterien zum Auffinden derselben benötigen, unabhängig von der Metrik, nur eine 3x3-Umgebung; für reguläre Metriken wird zudem eine Verallgemeinerung für den dreidimensionalen Fall angegeben. Durch diese Ergänzung lassen sich rekursiv monoton ansteigende Verbindungswege in der Distanzkarte finden; für den euklidischen Grenzfall wird ein entsprechendes, globales Steuerkriterium angegeben und seine Gültigkeit bewiesen; durch unmittelbare Verwendung der erzeugten Verbindungssequenzen lässt sich eine widerspruchsfreie, diskrete Skelettdarstellung erhalten.

Eine halb-kontinuierliche Umsetzung der Skelettidee (Kapitel 3) fasst die unmittelbar ans Objekt grenzenden Hintergrundpunkte als Punktwolke in der kontinuierlichen Ebene auf und bestimmt eine zusammenhängende Mittelachse aus der Gesamtheit der objektinternen Punktsymmetrieachsen durch Überprüfen der Güte der kreisigen Approximation; ein entsprechender einphasiger, sequentieller Algorithmus wird eingehend vorgestellt; er stellt gleichzeitig eine schnelle, sequentielle Alternative zu den üblichen, parallelen Verdünnungsschemata dar. Der halb-kontinuierliche Ansatz ist der allgemeinste; mit seiner Hilfe werden Probleme der rein diskreten Verfahren analysiert; gleichzeitig erlaubt er, geometrisch-topologische Dilemma-Situationen, wie sie entstehen durch Auffassen des diskreten Skeletts als Rasterstruktur, zu umgehen durch frühzeitiges Lösen vom Gitter.

Schliesslich wird die Vielseitigkeit der Distanztransformation und der Skelettdarstellung anhand einiger Anwendungsbeispiele dokumentiert (Kapitel 4).

Summary

An adequate, geometric and relational description of two-dimensional shapes has been a major research topic in pattern recognition ever since its early beginnings. A popular approach proposes to represent an object by the medial axis, or skeleton, of its silhouette; in this case the relational part of the description consists of a graph that reflects the connections between the individual branches of the skeleton; geometric features are derived from the shape of the axis and the radius function of each branch.

This representation is naturally fit to describe 'thin' structures such as can be found in technical drawings. They can be reduced to their longitudinal axes by an iterative erosion of the border under topological control such that the connectivity properties of the original are preserved. Chapter 1 summarizes the fundamentals of thinning, focuses on the transposition of the thinned image structures from the discrete grid into a manipulable data structure and generalizes this procedure.

The local width information is usually irrelevant for the interpretation of 'thin' structures. It is, however, an essential part of the description of more general shapes. Euclidean metric is mandatory to measure local width in order to ensure maximal invariance of the description with respect to scaling and rotation. Chapters 2 and 3 investigate the computability of a discrete medial axis; in fact, the skeleton concept, though well defined in the continuous case, has never been analyzed systematically with respect to discrete feasibility and adequacy for digital pattern recognition purposes.

Discrete procedures (chapter 2) determine local width by measuring the shortest distance of object points to the background (distance transformation) and store the corresponding radius function in a discrete distance map. Non-Euclidean metrics are presently used or else non-metric approximations computed for the sake of efficiency. A new, vector-based, sequential algorithm is therefore proposed which yields a correct Euclidean distance map.

A subset of object pixels is singled out by verifying characteristic properties of the skeleton in the distance map. Several criteria have been proposed that lead to substantially different results in spite of their equivalence in the continuous case. Thus, determining skeleton points as endpoints of shortest intrusion paths is computationally expensive and yields overcrowded skele-

tons; on the other hand, identifying skeleton points as centers of maximal inscribed disks requires a clumsy inclusion test and hence additional preprocessing; schemes that rely on local topographic classification finally are inherently fast, but do not ensure reconstructability and produce artificial branches that may be removed by local operations however.

Discrete methods yield a fragmentary medial axis. Additional saddle-points must be detected in the distance map by inspecting 3x3-surroundings of every pixel. The resulting, intermediate skeleton may be completed by recursively constructing monotonically ascending paths in the Euclidean distance map; a global criterion is proposed to control path generation and its validity is proved. The final relational description may be compiled from the corresponding pixel sequences.

A semi-continuous interpretation of the skeleton concept (chapter 3) views the boundary points of the figure as a set of disjoint points in the continuous plane; a connected skeleton is identified as a subset of all symmetry-axes with respect to pairs of points (Voronoi-diagram) by measuring the deviation of the circular approximation from the actual contour. A single-pass algorithm is proposed to this end; it represents a fast sequential alternative to the traditional parallel thinning schemes. This approach is general and allows therefore to analyze and solve problems of the discrete procedures; it avoids conflicts due to the limited resolution of the discrete grid.

Finally chapter 4 presents a few illustrative applications that prove the versatility of the distance transformation and the skeleton concept.