Reprinted from
Krönig D. and Lang M. (eds.) (1992) Physik und Informatik – Informatik und Physik. Springer, Berlin, pp. 71-73.

Relaxation im Orts/Geschwindigkeits-Raum

Berechnung objektbezogener Geschwindigkeits-Vektorfelder aus lokalen Messungen

Helmut Glünder‡

Institut für Medizinische Psychologie, Ludwig-Maximilians-Universität
Gœthestraße 31, D-8000 München 2, Germany

Es wird ein in der Physik übliches (Energie-)Minimierungsprinzip auf ein Grundproblem der Bewegtbildanalyse angewendet. Abweichend von den geläufigen mathematisch formalen Optimierungsansätzen und Lösungsalgorithmen, bzw. den dazu vielfach eingesetzten weitgehend universellen Hopfield- und Boltzmann-Netzen, wird hier eine anschauliche Netzwerk-Architektur vorgeschlagen, die nicht nur funktional sondern auch strukturell problemspezifisch ausgelegt ist.

Einführung

Geschwindigkeit ist ihrer differentiellen Definition gemäß, ebenso wie zum Beispiel der Helligkeitskontrast, ein lokales Maß. Nun ergibt sich aber keinesfalls an jedem Objektpunkt eines sich beispielsweise starr verschiebenden ausgedehnten Bildobjekts das gleiche, geschweige denn das wahre Maß, d.h. der wahre Geschwindigkeitsvektor. Es stellt sich somit die Frage, ob und wie aus der Gesamtheit der in einer Bildebene zu messenden Vektoren durch deren Verrechnung brauchbare Schätzungen wahrer Bewegungsvektoren zu ermitteln sind. Man weiß heute, daß dieses Problem unter Annahme wenig restriktiver Randbedingungen als Optimierungsproblem darzustellen und mit bekannten Methoden zu lösen ist [1–6]. Die bislang dazu vorgeschlagenen Berechnungsmethoden unterscheiden sich im wesentlichen in der Wahl dieser Randbedingungen und darin, ob flächig oder entlang von Konturen verrechnet wird sowie, welcher Optimierungs-Algorithmus angewendet wird. Abgesehen von universellen optimierenden Widerstandsnetzwerken [5, 7] sind derzeit keine Verfahren bekannt, die ausschließlich auf – möglichst biologisch plausiblen – hochparallelen Netzstrukturen beruhen oder zumindest nicht auf anderen weitgehend universellen Architekturen, also zum Beispiel Hopfield- oder Boltzmann-Netzwerken. Derart motiviert wird im folgenden ein Konzept vorgestellt, das schon durch seine physikalische Rechnerstruktur den Eigenheiten des konkreten Problems anschaulich Rechnung trägt.

Elementare Geschwindigkeitsmessung

Ohne Einschränkung der Allgemeinheit werden die elementaren Geschwindigkeitsmessungen in Form von Zuordnungen zwischen Bildpunkten zeitlich aufeinanderfolgender Momentaufnahmen angenommen, mithin also als Differenzmessungen. Jeder Punkt des zeitlich vorangehenden Bildes korrespondiert natürlich prinzipiell mit (sehr) vielen Punkten des nach der Zeitspanne Δt folgenden Bildes, so daß sich für jeden Punkt ein ganzes Spektrum vorerst gleichberechtigter Geschwindigkeitsvektoren $\vec{v}(\vec{r}, t) = \vec{\rho}(\vec{r}, t)/\Delta t$ ergibt (mit den Korrespondenzvektoren $\vec{\rho}(\vec{r}, t)$). Sicher weiß man nun von jedem Spektrum nur, daß es den wahren Vektor einschließt. Keineswegs sicher, aber recht wahrscheinlich ist es, daß benachbarte Bildpunkte zum selben Objekt gehören und somit zumindest ähnliche Geschwindigkeitsvektoren aufweisen (Standard-Randbedingung). Überdies kann für hinreichend kleine Zeitspannen Δt die Annahme einer oberen Grenzgeschwindigkeit sinnvoll und hilfreich sein, so daß die Korrespondenzspektren dann a priori begrenzt sind.

---

‡ gefördert durch die "Volkswagen-Stiftung" im Rahmen des 'Synergetik'-Programms, Projekt I/65 914

Relaxation

Durch geeignete Operationen im soeben definierten – und im einfachsten Fall binär besetzten – vierdimensionalen Orts/Geschwindigkeits-Zustandsraum soll jedem Ortspunkt eine möglichst gute Schätzung seines wahren Geschwindigkeitsvektors zugeordnet werden. Dazu wird eine – für den Fall starrer Verschiebungen nach Geschwindigkeit und Ort aufspaltbare – vierdimensionale Korrelation der Korrespondenzsignale $g(\vec{r}, \vec{v}, t)$ mit einer im allgemeinen orts- und geschwindigkeitsvarianten, jedoch zeitinvarianten Funktion $w(\vec{r}, \vec{v})$ vorgeschlagen, deren Resultat nichtlinear bewertet wird. Diese Verarbeitung wird solange wiederholt, bis ein zeitliches oder qualitatives Abbruchkriterium erreicht ist. Für sich verschiebende starre Objekte folgt damit in der einfachsten Form zum Zeitpunkt t und unter Vernachlässigung der Relaxationsdauer:

$$g_{i+1}(\vec{r}, \vec{v}) = \begin{cases} g_i(\vec{r}, \vec{v}) \ \underline{\mathrm{corr}} \ w(\vec{r}, \vec{v}) \\ 0 \quad \text{wenn} \quad g_i(\vec{r}, \vec{v}) < 1 \end{cases}$$

- Die Korrelation in den *Orts*dimensionen mit $w_{exc}(\vec{r})$ sorgt für eine (geringfügige) Erhöhung der Werte in einer (isotropen) *Orts*nachbarschaft jedes Punktes des Zustandraums. Die Schnittmenge der Geschwindigkeitsspektren benachbarter Bildpunkte erhält dadurch erhöhte Werte.

- Durch die Korrelation in den *Geschwindigkeits*dimensionen mit $w_{inh}(\vec{v})$ werden in einer (isotropen) *Geschwindigkeits*nachbarschaft jedes Punkts des Zustandraums die Werte (geringfügig) erniedrigt und folglich die nicht zur Schnittmenge gehörenden Geschwindigkeiten an jedem Bildpunkt geschwächt.

Aufgrund der wiederholten Anwendung relaxiert die Repräsentation im vierdimensionalen Zustandsraum auf für jeden Ort sinnvolle Geschwindigkeitsvektoren. Gilt $w_{exc}(\vec{r}) = -w_{inh}(\vec{v})$, so läßt sich für Verschiebungsanalysen entsprechend obiger Gleichung überdies zeigen, daß der wahre Vektor im Verlauf der Relaxation notwendigerweise erhalten bleibt.

Netzwerkarchitektur

Zur Analyse ortsdiskreter Bildsignale läßt sich eine einfache und global betrachtet hochrepetitive zweidimensionale Netzstruktur angeben, die jedoch eine regional inhomogene Verschaltung aufweist. Als Rechenelemente dienen Summierer deren Ausgangssignale nichtlinear bewertet werden. Größen, die die örtlich-zeitliche Korrespondenz von Bildpunkten und damit das Vorhandensein potentieller Geschwindigkeitsvektoren ausdrücken, bilden die externen Eingangssignale des Netzwerks. Netzinterne Eingangssignale der Rechenelemente stammen jeweils von den Ausgängen zweier Gruppen umliegender Elemente. Ordnet man jedem Ort der Bildebene einen Netzwerkbereich zu, in dem alle möglichen Geschwindigkeitsvektoren durch Rechenelemente vertreten sind (zweidimensionale Darstellung des vierdimensionalen Zustandraums mit erhaltener örtlicher Topographie), so muß jedes dieser Elemente mit den vektoriell gleich definierten Elementen benachbarter Bildpunkten in Verbindungen stehen (Korrelation in den Ortsdimensionen). Neben dieser für die gewählte Topographie 'weitreichenden' Erregung stehen die Rechenelemente an jedem Ort mit ihren vektoriell benachbarten Elementen in negativ bewerteter Verbindung (Korrelation in den Geschwindigkeitsdimensionen), so daß 'kurzreichweitige' Hemmung vorliegt. Das gesamte Netzwerk ist zeitinvariant.

Schlußbemerkungen

Verglichen mit einer langwierigen seriellen Abarbeitung sowohl der einzelnen Korrelationen als auch des übergeordneten Relaxationsprozesses, relaxiert ein geeignet ausgelegtes Netzwerk der geschilderten Architektur unmittelbar, nur begrenzt durch Latenzen in Verbindungen und Rechenelementen. Bei zumindest kurzzeitig gleichförmiger Bewegung beschleunigt sich dieser Vorgang, da sich dann Objektpunkte in bezüglich der vorangehend berechneten Geschwindigkeit sensibilisierte Bereiche hineinbewegen [8, 9].

Die örtliche Zuordnung von Geschwindigkeiten gelingt auch für solche – meist innere – Objektbereiche, in denen isoliert betrachtet keinerlei Bewegung zu messen ist. Das heißt, das Verfahren propagiert zuverlässige Geschwindigkeitsvektoren in derartige Bereiche. Außerdem können sich an jedem Bildpunkt mehrere – allerdings nur hinreichend unterschiedliche – Geschwindigkeitsvektoren ergeben, was nicht zuletzt in Hinblick auf die Analyse sogenannter transparenter Bewegung zu fordern ist [10, 11].

Im Gegensatz zur Mehrzahl der bekannten Vorschlägen zeigt das hier vorgeschlagene Netzwerk-Konzept funktional wie strukturell gute Übereinstimmung mit entsprechenden zentralnervösen Verarbeitungsstrukturen ([12] Kapitel 35). Da der belebten Natur die formal-deduktive mathematische Behandlung von Problemen der Informationsverarbeitung nicht geläufig ist, sie aber allem Anschein nach mit mathematisch formulierbaren physikalisch-induktiven Prinzipien in Einklang stehen muß, wird man in biologischen Systemen vergeblich nach Implementierungen von beispielsweise algorithmischen Lösungen formal konstruierter Optimierungsintegrale Ausschau halten.

Literatur

[1] Ullman S. (1979) *The Interpretation of Visual Motion.* The MIT Press, Cambridge/MA.

[2] Horn B. K. P. und Schunck B. G. (1981) Determining optical flow. *Artif. Intell.* **17**: 185-203.

[3] Nagel H.-H. (1983) Displacement vectors derived from second-order intensity variations in image sequences. *Comput. Vision Graphics Image Process.* **21**: 85-117.

[4] Hildreth E. C. (1984) *The Measurement of Visual Motion.* MIT-Press, Cambridge/MA.

[5] Poggio T., Torre V. und Koch C. (1985) Computational vision and regularization theory. *Nature* **317**: 314-319.

[6] Yuille A. L. und Grzywacz N. M. (1988) A computational theory for the perception of coherent visual motion. *Nature* **333**: 71-74.

[7] Wang H. T., Mathur B. und Koch C. (1989) I thought I saw it move: computing optical flow in the primate visual system. In: Gluck M. A. und Rumelhart D. E. (Hrsg.) *Neuroscience and Connectionist Theory.* Erlbaum, Hillsdale/NJ.

[8] Anstis S. und Ramachandran V. S. (1987) Visual inertia in apparent motion. *Vision Res.* **27**: 755-764.

[9] Snowden R. J. (1989) Motion in orthogonal directions are mutually suppressive. *J. Opt. Soc. Am. A* **6**: 1096-1101.

[10] Doorn A. J. van und Koenderink J. J. (1982) Temporal properties of the visual detectability of moving spatial white noise. *Exp. Brain Res.* **45**: 179-188.

[11] Doorn A. J. van, Koenderink J. J. und Grind W. A. van de (1985) Perception of movement and correlations in stroboscopically presented noise patterns. *Perception* **14**: 209-224.

[12] Braitenberg V. und Schüz A. (1991) *Anatomy of the Cortex. Statistics and Geometry.* Band 18 der Reihe *Studies of Brain Function.* Springer, Berlin.

D. Krönig M. Lang (Hrsg.)

Physik und Informatik – Informatik und Physik

Arbeitsgespräch
München, 21. / 22. November 1991

Proceedings

ITG Φ

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York London Paris
Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest