

Tutorial

Filter

Welcome to the world of
vcwin®
the graphic user interface
for machine vision systems
made by Vision & Control



Filter

Files

1 Grundlagen.....	3
2 Tiefpassfilter.....	5
3 Hochpassfilter.....	8
3.1 Richtungsunabhängige Hochpassfilter.....	8
3.2 Richtungsabhängige Hochpassfilter.....	10
3.2.1 Sobel-Filter.....	10
3.2.2 Prewitt-Filter.....	13
4 Rangordnungsfiler.....	15
4.1 Minimum-Filter.....	15
4.2 Maximum-Filter.....	17
4.3 Median-Filter.....	19
5 Quellenverzeichnis.....	22

Filter

1. Filter

Was sind Softwarefilter und wozu dienen Sie?

Bei Softwarefiltern handelt es sich um lokale Bildoperatoren, die auf ein Ausgangsbild angewendet werden, wobei ein neues, gefiltertes Bild entsteht. Diese Filter werden verwendet, um Merkmale eines Bildes oder Bildausschnittes (Prüffenster) hervorzuheben, zu unterdrücken, oder die Bildqualität zu verbessern. Es kommt dabei auf die Verstärkung der gewünschten Merkmale und Eigenschaften des Bildes an.

Hauptziele:

- Verminderung von Signalrauschen
- Glättung
- Kantendetektion
- Beseitigung von Bildstörungen wie Staub oder Kratzer

Im weiteren Verlauf dieses Tutorials bezieht sich der Begriff Filter immer auf Softwarefilter.

Filterarten

Man unterscheidet prinzipiell zwischen zwei Arten von Filtern:

- lineare Filter und
- nichtlineare Filter.

Bei linearen Filtern wird mit Hilfe einer Filtermatrix (Maske) **H** aus einem Bild **f** ein neues Bild **f'** berechnet. Sie entsprechen einer 2-dimensionalen diskreten Faltung.

Formel: $f' = H * f$

Zu den linearen Filtern gehören:

- linearer Tiefpassfilter und
- linearer Hochpassfilter.

Filter

Nichtlineare Filter besitzen im Gegensatz zu der anderen Gruppe keine inverse Operatoren. Die Werte, welche in das neue Bild geschrieben werden, sind nicht berechnet, sondern durch den Filter anhand bestimmter Kriterien aus den Einflussbereich des Filters einfach ausgewählt. Zuerst werden die Grauwerte des Bildausschnittes ihrer Größe nach sortiert. Danach wird aus diesen sortierten Werten einer ausgewählt, der dann ins neue Bild geschrieben wird.

Zu den nicht-linearen Filtern gehören:

- Rangordnungsfiler und
- Hit-or-Miss-Transformation
- Sonstige Nachbarschaftsoperationen

Für den Bereich der nicht-linearen Filter werden wir uns in diesem Tutorial lediglich mit den Rangordnungsfilern beschäftigen. Sie sind ein wesentlicher Bestandteil der Bildvorverarbeitungsfunktionen der Vision & Control BV-Bibliothek.

Filter

2. Tiefpassfilter

Tiefpassfilter unterdrücken im Ortsfrequenzbereich hohe Frequenzen. Im gefilterten Bild bedeutet das, daß harte Wechsel der - Grauwerte (großer Grauwertunterschied) innerhalb weniger Pixel unterdrückt werden. Durch Tiefpassfilter werden Kantenkontraste abgeschwächt und die Grauwerte werden einander angepasst, das Bild wird unschärfer und das Bildrauschen wird minimiert - es kommt zu einer Weichzeichnung des Bildes. Dieser Vorgang wird meist durch Mittelwertbildung mit den im Filterkern enthaltenen Pixeln erreicht.

Typische Auswirkungen von Tiefpassfiltern sind:

- der visuelle Eindruck des Bildes wird "weicher"
- Grauwertkanten werden verwischt
- Rauschunterdrückung
- In den homogenen Teilen eines Bildes (also den nicht-hochfrequenten) haben Tiefpassfilter so gut wie keine Auswirkung

Wegen dieser Eigenschaften werden Tiefpassfilter auch Glättungsfilter genannt, die Anwendung eines solchen Filters kurz als "Glättung".

Beispiele:

- Mittelwertfilter (Rechteckfilter)
- Binominalfilter
- Gauß-Filter

Rechteckfilter: Der einfachste Mittelwertfilter ist der Block- oder Rechteckfilter (Beispiel). Bei Verwendung dieses Filters erfolgt eine Glättung des Bildes durch Mittelwertbildung der einzelnen Pixel im vorgegebenen Filterkern. Die Pixel im Filterkern sind alle gleich gewichtet.

Binominalfilter: Eine unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Pixel wird beim Binominalfilter (Beispiel) benutzt. Hierbei entsprechen die Filtermaskenwerte der diskreten Binominalverteilung.

Filter

Tiefpassfilter bei Vision & Control

Der Tiefpassfilter der in der Funktion "Bildvorverarbeitung" integriert ist stellt einen Gaußschen Filter dar. Dabei werden die Pixel im Filterkern auf Basis der "gaußschen Glocke" gewichtet. Im Gegensatz zum Mittelwertfilter, bei dem alle Nachbarpixel unabhängig von der Distanz zum Mittelpixel das gleiche Stimmrecht haben, wird beim Gauß-Filter die Pixel in unmittelbarer Umgebung zum Mittelpixel stärker gewichtet.

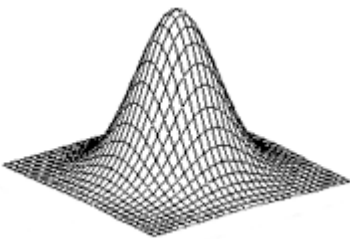


Abbildung 1: Gaußsche Glocke [Quelle: http://www.miszalok.de/Lectures/L07_ImageProcessing/IP_Filters/IP_Filters_deutsch.htm]

Gauß-Filter der Größe $n \times m$ und einer Varianz σ^2 werden durch die folgende Impulsantwortmatrix beschrieben.

$$g_{nm} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{n^2+m^2}{2\sigma^2}}$$

Der Gauß-Filter hat eine gleichmäßige Wirkung auf hochfrequente Bildanteile wie Kanten und isolierte Störungen. Diese Kanten und Störungen werden dabei weniger verwischt als beim Rechteckfilter.

Filter	Funktion	Beschreibung
Tiefpass	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$	3 x 3 Tiefpass
	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 8 & 4 & 1 \\ 2 & 8 & 16 & 8 & 2 \\ 1 & 4 & 8 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	5 x 5 Tiefpass

Tabelle 1: Tiefpassfilter (Gauß) im vicosys

Filter

Filter	Funktion	Beschreibung
Tiefpass	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$	3 x 3 Tiefpass

Tabelle 2: Tiefpassfilter (Gauß) im pictor

Im Gegensatz zum vicosys ist der 5 x 5 Tiefpass im pictor ebenfalls als 3 x 3 Gauß-Filter realisiert. Jedoch ist zu beachten, dass per "default" im Dialog immer eine 3 x 3 Matrix verwendet wird. Um eine 5 x 5 Maske für vicosys anzuwenden, muss diese per vicorem-Code parametrisiert werden. Ein Aufruf aus dem Dialog heraus funktioniert nicht.

Filter

3. Hochpassfilter

Hochpassfilter unterdrücken im Ortsfrequenzbereich niedere Frequenzen. Im gefiltertem Bild bedeutet das, daß starke Kontraste über wenige Pixel hervorgehoben werden. Schleichende Wechsel der Grauwerte (geringer Grauwertunterschied) hingegen werden unterdrückt. Durch Hochpaß-Filter werden Kantenkontraste verstärkt; das Bild erscheint schärfer. Sie werden daher werden auch als Kantenfilter bezeichnet.

Typische Auswirkungen:

- der visuelle Bildeindruck wird "härter"
- feine Strukturen werden hervorgehoben
- Grauwert-Übergänge (Kanten) werden verstärkt bzw. extrahiert
- homogene Bildbereiche werden gelöscht

Beispiele:

- Scharfzeichnungsfilter
- Laplace-Filter
- Prewitt-Filter
- Sobel-Filter

In der Bildverarbeitungsbibliothek von Vision & Control sind der Laplace-, Prewitt- und Sobel-Filter implementiert. Im weiteren Verlauf dieses Tutorials werden wir auf diese Kantenoperatoren näher eingehen.

3.1. Richtungsunabhängige Hochpassfilter

Laplace-Filter (Laplace-Operator)

Der Laplace-Operator ist ein richtungsunabhängiger Kantenfilter, der sowohl in vertikale, horizontale als auch diagonale Richtung arbeitet und die 2. Ableitung des Bildes darstellt. Jede Kante führt beim Laplace-Filter zu Doppelkonturen. Der Kantenort ist nicht das Maximum sondern, der Null-durchgang (Zero-Crossing).

Der Laplace-Operator ist für kontinuierliche Funktionen folgendermaßen definiert:

$$\mathbf{L} = \frac{\partial^2 I[x, y]}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I[x, y]}{\partial y^2}$$

Filter

Vorteile:

- bevorzugt steile Grauwertdifferenzen
- setzt alle homogenen Bildareale auf Null
- einfach und schnell

Nachteil: Beim Laplace-Filter kommt es zu einer Verstärkung des Rauschens im Bild.

Beispiel: Laplace-Filter

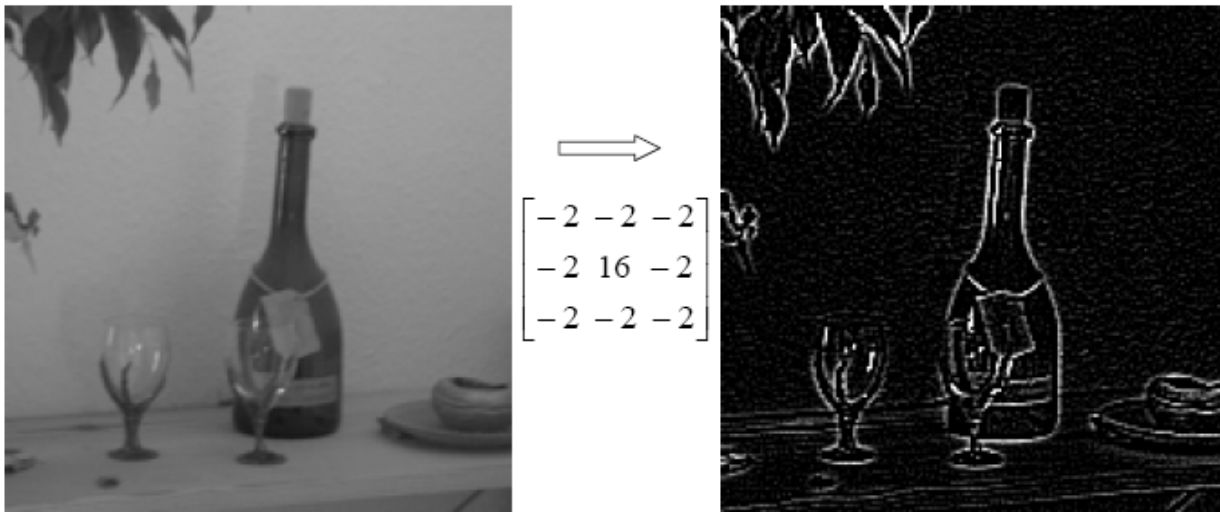


Abbildung 2: Originalbild und gefiltertes Bild nach Anwendung der Filtermaske in der Mitte

Laplace-Filter bei Vision & Control

Rahmen der Bildvorverarbeitungsfunktion der Vision & Control Bibliothek ist ein Laplace-Filter implementiert. Dabei tritt zwischen den unterschiedlichen Hardwareplattformen pictor und vicosys Unterschiede im Verhalten des Filters auf.

Filter	Funktion	Beschreibung
Laplace	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	3 x3 Laplace-Filter

Filter

Filter	Funktion	Beschreibung
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ -1 & -2 & 16 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	5 x5 Laplace-Filter

Tabelle 3: Laplace-Filter im vicosys

Filter	Funktion	Beschreibung
Laplace	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ <p>mit Normierung auf 4, unabhängig von der Größe der Matrix (3 x 3 bzw. 5 x 5)</p>	3 x3 Laplace-Filter

Tabelle 4: Laplace-Filter im pictor

Im Gegensatz zum vicosys ist der 5 x 5 Laplace-Filter im pictor ebenfalls als 3 x 3 Laplace-Filter realisiert.

3.2. Richtungsabhängige Hochpassfilter

3.2.1. Sobel-Filter

Der Sobel-Operator ist ein richtungsabhängiger Kantenfilter, der eine Differenzoperation benachbarter Bildpunkte gekoppelt mit einer Mittlungsoperation darstellt. Diese Methode der Kantenextraktion verwendet eine Reihe aufeinanderer abgestimmter Filteroperatoren, die Kanten in verschiedenen Richtungen extrahieren. Der Sobel-Filter enthält eine Glättung quer zur Gradientenrichtung mit einer Binominal-Filtermaske. Die Binomial-Verteilung wird als diskrete Approximation der Gauß-Verteilung verwendet. Dabei steigt die Approximationsgüte mit der Größe der Maske. Mit dieser Art der Gewichtung soll die Entstehung von Artefakten bei der Filterung verhindert werden. Der Operator berechnet die erste Ableitung der Bildpunkt-Helligkeitswerte, wobei gleichzeitig orthogonal zur Ableitungsrichtung geglättet wird. Das Maximum der Helligkeit ist der exakte Kantenort.

Filter

Man unterscheidet:

- horizontale,
- vertikale
- und diagonale Sobel-Operatoren

Diese Operatoren weisen unterschiedliche Filterkerne auf.

Horizontaler Sobelfilter

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

Vertikaler Sobelfilter

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Diagonaler Sobelfilter

-2	-1	0
-1	0	1
0	1	2



Beim Sobel-Filter werden mehrere Kantefilter nacheinander ausgeführt und kombinieren deren Ergebnisse zu einem einzigen Ausgangsbild. Wenn man das Originalbild als Matrix A definiert, dann kann man mittels der Sobeloperatoren S_x und S_y die gefalteten Resultate G_x und G_y berechnen:

$$G_x = S_x * A = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * A$$

und

Filter

$$G_y = S_y * A = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A$$

Eine richtungsunabhängige Information kann an durch die Kombination beider Ergebnisse erhalten:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Vorteile:

- einfacher und schneller Filter
- Rauschunterdrückung durch gewichtete Mittlung
- Kanten werden auch bei einem relativ flachem Grauwertübergang deutlich hervorgehoben.
- linear

Nachteil:

- es können ausschließlich Kanten detektiert werden, die sich senkrecht zur Laufrichtung befinden
- Es kommt zu einer Verbreiterung der Kanten.

Sobel-Filter bei Vision & Control

Im Rahmen der Bildvorverarbeitungsfunktion der Vision & Control Bibliothek ist ein Sobel-Filter implementiert. Dabei ist zu beachten, dass sowohl beim pictor wie auch beim vicosys der Sobel-Filter mit einer 3 x 3 Filtermatrix arbeitet. Diese wird auch bei der 5 x 5 Filtermatrix verwendet.

Filter	Funktion	Beschreibung
Sobel	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} = GY$ $\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = GX$	3 x 3 Sobel-Filter

Tabelle 5: Sobelfilter für vicosys

Weiterhin ist zu beachten, dass es für den Sobel-Filter lediglich eine Implementierung einer 3 x 3 Matrix gibt. Dieser wird bei der Auswahl einer 5 x 5 Matrix ebenfalls aufgerufen. Dies gilt sowohl für pictor als auch für vicosys.

Filter

3.2.2. Prewitt-Filter

Der Prewitt-Operator ist ebenfalls ein Kantendetektor, welcher ähnlich dem Sobel-Operator ist. Nur werden bei diesem Filter die Grauwerte in der aktuellen Gradientenrichtung nicht zusätzlich gewichtet. Analog zum Sobel-Operator erhält man als Ausgabe des Kantendetektors ein Gradientenbild in X und eines in Y-Richtung. Durch das Einbeziehen von Nachbarn in die Berechnungen wird eine Glättungswirkung senkrecht zur Richtung der Differenzbildung erzielt. Diese geringere Rauschanfälligkeit wird mit einer etwas verbreiterten Kante erkauft.

Die Kantenstärke wird analog zum Sobel-Operator berechnet.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Vorteile:

- einfacher schneller Filter
- Rauschunterdrückung durch Mittlung
- linear

Nachteile:

- schwächer als Sobel-Filter
- richtungsabhängig

Prewitt-Filter bei Vision & Control

Neben dem Laplace- und Sobel-Filter ist mit dem Prewitt-Operator noch ein weiterer Kantendetektionsfilter in der Bildvorverarbeitungsfunktion der BV-Bibliothek von Vision & Control implementiert. Es ist darauf zu achten, dass es bei den beiden Hardwareplattform pictor und vicosys zu unterschiedlichem Verhalten kommt. Für beide Varianten ist lediglich eine 3 x 3 Matrix verwendet worden.

Filter	Funktion	Beschreibung
Sobel	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} = GY$ $\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = GX$	3 x 3 Sobel-Filter

Tabelle 6: Prewitt-Filter im vicosys

Filter

Es ist darauf zu achten, dass beim pictor der Prewitt-Filter dem Sobel-Filter entspricht. Es gibt somit keine separate Implementierung für den Prewitt-Filter in den Smart Kameras. Weiterhin ist zu beachten, dass in den Mehrkammersystemen vicosys lediglich eine Implementierung einer 3 x 3 Matrix für den Prewitt-Filter existiert. Dieser wird bei der Auswahl einer 5 x 5 Matrix ebenfalls aufgerufen.

Filter

4. Rangordnungsfilter

Die Rangordnungsfilter gehören zur Klasse der nichtlinearen Filter. Das sind Filter, die nicht durch eine Faltung beschrieben werden können. Oftmals werden sie auch als morphologische Operatoren bezeichnet.

Bei den Rangordnungsfiltern werden die Grauwerte der Pixel in einer definierten Umgebung eines Pixels aufgesammelt und der Größe nach sortiert. Nun wird ein Grauwert aus dieser sortierten Liste ausgewählt, der den Grauwert des aktuellen Pixels ersetzt.

Die Wahl der Position bestimmt die Art des Rangordnungsfilters, man erhält den

- Minimumfilter (Erosion), für den minimalen Grauwert, erste Position der Liste
- Medianfilter, für den Grauwert, der sich in der Mitte der Liste befindet
- Maximumfilter (Dilatation), für den maximalen Grauwert, letzte Position der Liste

Anwendung: Rangordnungsfilter werden vor allem verwendet, um diskrete Bildstörungen wie etwa Staub oder Kratzer auf einer eingescannten Vorlage zu eliminieren.



Abbildung 3: Rangordnungsfilter [Quelle:] http://www.ipi.uni-hannover.de/html/lehre/lehrveranstaltungen/Dig-Bildverarbeitung/Bildverarbeitung_Kap08_Nichtlineare_lokale_Filter_2006.pdf

4.1. Minimum-Filter

Beim Minimum-Filter, auch Erosion genannt, werden die Grauwerte der Pixel in einer definierten Umgebung eines Pixels aufgesammelt und der Größe nach sortiert. Nun wird der kleinste Grauwert dieser sortierten Liste gewählt, dieser ersetzt den Grauwert des aktuellen Pixels. Dadurch werden helle Pixel aus dunklen Regionen entfernt. Die Bildinformationen werden geglättet, wobei die Kantensteilheit beibehalten wird.

Filter

Beispiel:

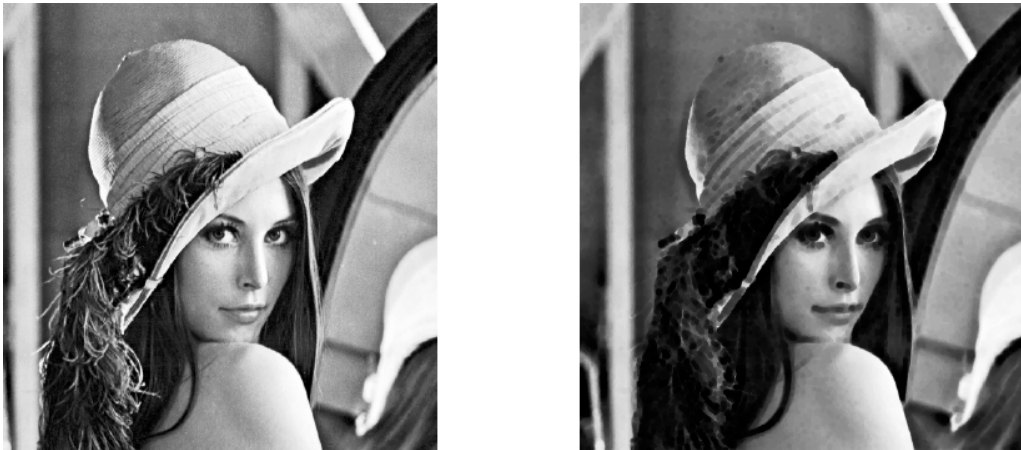


Abbildung 5: links: Originalbild - rechts: Bild nach Minimum-Filterung mit 5 x 5 Matrix

Der Minimum-Filter ist wesentlicher Bestandteil der Bildverarbeitungsfunktion der Vision & Control BV-Bibliothek. Er ist sowohl im pictor als auch im vicosys implementiert.

4.2. Maximum-Filter

Beim Maximum-Filter, auch Dilatation genannt, werden die Grauwerte der Pixel in einer definierten Umgebung eines Pixels aufgesammelt und der Größe nach sortiert. Nun wird der größte Grauwert dieser sortierten Liste gewählt, dieser ersetzt den Grauwert des aktuellen Pixels. Dadurch werden dunkle Pixel aus hellen Regionen entfernt. Die Bildinformationen werden geglättet, wobei die Kantensteilheit beibehalten wird.

Filter

Beispiel:



Abbildung 7: links: Originalbild - rechts: Bild nach Maximum-Filterung mit 5 x 5 Matrix

Der Maximum-Filter ist wesentlicher Bestandteil der Bildvorverarbeitungsfunktion der Vision & Control BV-Bibliothek. Er ist sowohl im pictor als auch im vicosys implementiert.

4.3. Median-Filter

Beim Median-Filter werden die Grauwerte der Pixel in einer definierten Umgebung eines Pixels aufgesammelt und der Größe nach sortiert. Der mittlere Wert der sortierten Liste wird zurückgegeben und der Wert des zentralen Pixels wird durch ihn ersetzt. Dabei werden Ausreißerpixel, auch "Salt and Pepper" genannt, durch Pixel aus der Umgebung ersetzt.

Filter

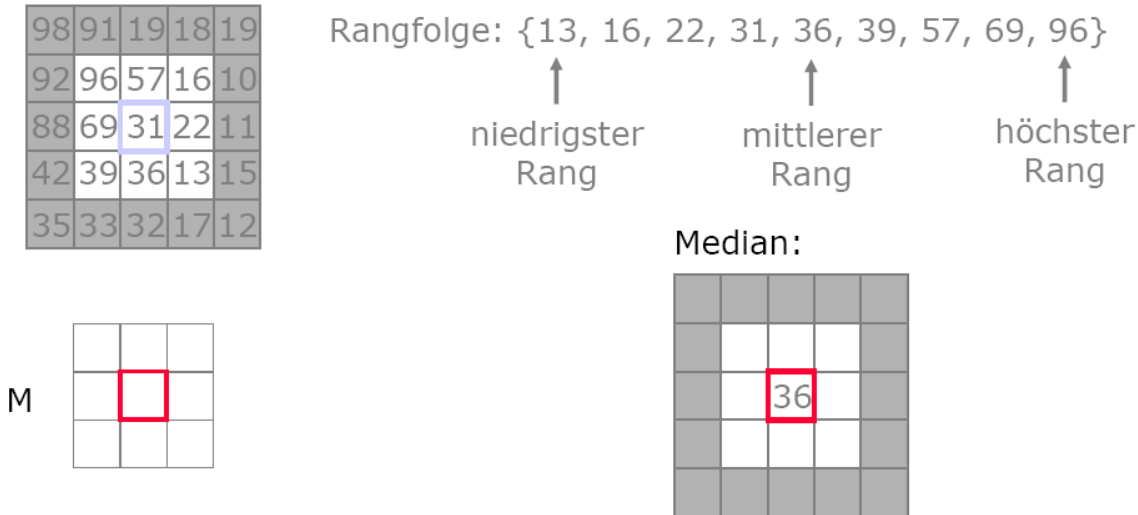


Abbildung 8: Sortierung mittels Median-Filter

Formel: $t(\{n_1, n_2, \dots, n_k\}) = n_{(k+1)/2}$

Beispiel: $f_1(k) = 11, 12, 11, 9, 13, 15, 14$

$med\{f_1(k)\} = 12$

Eigenschaften:

- Der Median-Filter wird so berechnet, dass der Ergebniswert für eine Pixel-Nachbarschaft der Mittelwert der Grauwerte in dieser Nachbarschaft ist.
- Der Median-Filter bewirkt eine Glättung des Bildes bei Erhalt der Kantensteilheit.
- Die Kanten werden nicht verschmiert - das Bild verliert kaum an Schärfe.
- es entstehen keine neuen Grauwerte
- Der Filter beseitigt kleine sporadische Bildstörungen.
- nichtlineares Frequenzverhalten

Anwendung:

- Filterung von "Salt and Pepper" Rauschen
- in Verbindung mit großen Masken dient er zur Glättung des Ausgangsbildes

Filter

Vorteil:

- gegenüber Boxfilter: einzelne Pixel werden ersetzt, ohne dadurch eine Kantenglättung zu bewirken
- entfernt punktförmige Störungen ohne das Bild unscharf zu machen

Nachteil:

- dünne Linien können verschwinden
- Schwächen bei Schrift - ein 3 x 3 Median Filter lässt alle "Striche" weg die kleiner 2 Pixel breit sind

Beispiel:



Abbildung 9: links: Originalbild - rechts: Bild mit Salt and Pepper Rauschen - rechts: Bild nach Median-Filterung mit 3 x 3 Matrix

Bei der Implementierung des Median-Filter gibt es zwischen pictor und vicosys deutliche Unterschiede. Beim pictor entspricht der Median-Filter einem 3 x 3 Gauß-Filter. Es ist kein richtiger Median-Filter im pictor verfügbar. Anders ist dies beim vicosys. Hier wurde dieser Filter als 3 x 3 Median-Filter implementiert. Dieser Unterschied zwischen den Hardwareplattformen ist bei der Anwendung der Bildvorverarbeitungsfunktion zu beachten.

Filter

5. Quellenverzeichnis

- [Jäh2005] Benrd Jähne; "Digitale Bildverarbeitung", 6. Auflage, 2005
[Sim2005] Ghislain Simo Mbodna; "Optimierung eines statistischen und räumlichen Bildsegmentierungsverfahrens", TU Berlin, 2005
[Dem2002] Christian Demant, Peter Waszkewitz, Bernd Streicher-Abel; "Industrielle Bildverarbeitung", 2002
[Tön2005] Klaus Tönnies; "Grundlagen der Bildverarbeitung", 2005

Internetquellen

- [1] <http://elbrechter.de/Digitale%20Filter%20in%20der%20Bildverarbeitung-Dateien/frame.htm>
[2] http://www.mindwatchers.de/projects/filterguide/filter_einfuehrung.html
[3] http://www.miszalok.de/Lectures/L07_ImageProcessing/IP_Filters/IP_Filters_deutsch.htm
[4] <http://www.kreissl.info/diggs/bildererkennung.php>
[5] <http://www.imfd.tu-freiberg.de/lehre/Fluid/MT/Filter.pdf?PHPSESSID=64370c1bb57415509854dfcc0dc8a819>
[6] <http://www.anigators.de/cvision/Filter-o-Rama.html>
[7] http://www.ipi.uni-hannover.de/html/lehre/lehveranstaltungen/DigBildverarbeitung/Bildverarbeitung_Kap08_Nichtlineare_lokale_Filter_2006.pdf
[8] http://www.ipi.uni-hannover.de/html/lehre/lehveranstaltungen/DigBildverarbeitung/Bildverarbeitung_Kap08_Nichtlineare_lokale_Filter_2006.pdf