

УНИВЕРЗИТЕТ “СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ”
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ – СКОПЈЕ
ИНСТИТУТ ЗА ИНФОРМАТИКА

Игор Стојановиќ

**ПРИМЕНА НА ПРОГРЕСИВНА ВЕЈВЛЕТ
КОРЕЛАЦИЈА ЗА ПРЕПОЗНАВАЊЕ И
ИЗВЛЕКУВАЊЕ НА СЛИКА
ОД КОЛЕКЦИЈА НА СЛИКИ**

докторска дисертација

Скопје, 2011

Ментор **Д-р Смиле Марковски**, редовен професор
Природно-математички факултет
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” - Скопје

**Членови на
комисијата:** **Д-р Смиле Марковски**, редовен професор
Природно-математички факултет
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” - Скопје

Д-р Сузана Лошковска, редовен професор
Факултет за електротехника и информациски
технологии
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” - Скопје

Д-р Маргита Кон-Поповска, редовен професор
Природно-математички факултет
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” - Скопје

Д-р Марјан Гушев, редовен професор
Природно-математички факултет
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” - Скопје

Д-р Момчило Богданов, редовен професор
Факултет за електротехника и информациски
технологии
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” – Скопје

**Датум на
одбрана:** _____

**Датум на
промоција:** _____

**Научна
област:** **Информатика**

Игор Р. Стојановиќ

ПРИМЕНА НА ПРОГРЕСИВНА ВЕЈВЛЕТ КОРЕЛАЦИЈА ЗА ПРЕПОЗНАВАЊЕ И ИЗВЛЕКУВАЊЕ НА СЛИКА ОД КОЛЕКЦИЈА НА СЛИКИ

Резиме: Развиен е алгоритам за препознавање и извлекување на слика од колекција на слики. Основа на алгоритамот е прогресивната вејвлет корелација. Крајниот резултат е препознавање и извлекување на бараната слика, ако таа постои во колекцијата на слики. Дефинирани се инструкции за избор на вредноста на прагот на корелација за добивање на саканиот резултат. Дискутирани се областите во кои алгоритамот може да се примени. За зголемување на ефикасноста презентиранио е решение од две фази. Првата фаза користи познати методи за извлекување на слики со дескриптори базирани врз содржина на бараната слика. Во втората фаза методот прогресивна вејвлет корелација се применува над мал број слики кандидати селектирани во претходната фаза. Експерименти се вршени на бази од податоци од 1000 и 10 000 слики користејќи ја базата Oracle и компонентата на Matlab Database Toolbox за работа со бази на податоци. Алгоритамот е применлив на различни формати на слики.

Презентиран е метод за реставрирање на слики кој се користи пред сликите да бидат складирани во системот за складирање. Предности на методот во однос на другите методи се во зголемување на вредностите на параметарот за подобрување на односот сигнал/шум и во намалување на времето потребно да се заврши процесот на реставрирање.

Клучни зборови:

Бази на податоци, вејвлети, дискретна косинусна трансформација, извлекување на слики базирано врз содржина, Лагранжови множители, мултирезолуција, препознавање, прогресивна вејвлет корелација, реставрација на слика.

Igor Stojanovic, MSc

**APPLICATION OF THE PROGRESSIVE WAVELET CORRELATION
FOR IMAGE RECOGNITION AND RETRIEVAL FROM THE
COLLECTION OF IMAGES**

Abstract: An algorithm for recognition and retrieval of image from image collection is developed. Basis of the algorithm is the progressive wavelet correlation. The final result is the recognition and retrieval of the wanted image, if it is in the image collection. Instructions for the choice of correlation threshold value for obtaining desired results are defined. The areas where the algorithm can be applied are also discussed. To increase efficiency is presented two phases solution. The first phase uses well-known methods of image retrieving by descriptors based on the content of the searched image. In the second phase the progressive wavelet correlation method is applied on the small number of image candidates selected in previous phase. Experiments are performed with data bases of 1000 and 10 000 images, using Oracle data base and the Matlab component Database Toolbox for operations with data bases. The algorithm is applicable to different formats of images.

A method for image restoration is presented which is used before the images are being inserted in storage systems. Advantages of the method over other methods are increasing the values of the parameter Improvement in Signal to Noise Ration and reduce the time required to complete the process of restoration.

Key words:

Content-based image retrieving, data bases, discrete cosine transform, image restoration, Lagrange multipliers, multiresolution, progressive wavelet correlation, recognition, wavelets.

Содржина

Вовед	1
Мотивација и формулација на проблемот	7
Главни придобивки.....	9
Организација	13
1. Извлекување на слики базирано врз содржина	15
1.1. CBIR техники	17
1.2. Достапни CBIR системи	17
2. Метод за препознавање и извлекување на слики базиран врз сликовни елементи	23
2.1. Прелиминарни поими.....	24
2.2. Алгоритам за мултирезолуциска анализа.....	28
3. Хибриден алгоритам за препознавање на слики	33
3.1. Реставрирање на слики	36
3.2. Области во кои предложениот хибриден алгоритам за препознавање на слики е применлив	36
Заклучок	41
Литература	45
Додаток.....	57

Листа на акроними

BFILE	Binary File
CAD	Computer Aided Design
CBIR	Content Based Image Retrieval
CLOB	Character Large Object
DCT	Discrete Cosine Transform
ISNR	Improvement in Signal to Noise Ration
JDBC	Java Database Connectivity
LOB	Large Objects
MSE	Mean Squared Error
NCLOB	National Character Large Object
ODBC	Open Database Connectivity
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio
PWC	Progressive Wavelet Correlation
QBIC	Query By Image Content
SQL	Structured Query Language

Вовед

Сликите, цртежите и фотографиите како средство за комуникација меѓу луѓето, за праќање и примање пораки од многу одамна се дел од секојдневниот живот. Почнувајќи со цртежи во пештерите во далечното минато, развивајќи се постојано, сликите во минатиот век забележаа неспоредлив раст во бројот, достапноста и нивната важност во најразлични професии. Вклученоста на компјутерите во обработка на слики датира од 1963 година со проектот *Sketchpad* на *Ivan Southerland* [94]. Во проектот се изложени можности за креирање, контрола и складирање на слики со помош на компјутери. Тогашната висока цена на хардверот ја ограничила нивната примена сè до средината на осумдесеттите години.

Лесно поставување на World Wide Web (web), намалување на цената на уредите за складирање и зголемената пресметувачка моќ даваат можност за неопходното и ефикасно управување на големо количество дигитални информации. Сликите денес се со голема разноликост во визуелна и семантичка содржина, опфаќајќи географски различни локации. Нивниот број брзо се зголемува. Сите овие фактори нудат огромен број можности за дизајнерите на реални комерцијални системи за препознавање и извлекување на слики.

Процесот на дигитализација на слики сам по себе не ги чини колекциите на слики полесни за управување. Одредена форма на каталогизирање и индексирање е сеуште неопходна. Единствената разлика е што голем дел од потребната информација може потенцијално автоматски да биде извлечена

од самите слики. Потребата за ефикасно складирање и извлекување на слики, препознаена пред многу години од менаџери на големи колекции на слики, повторно била поттикната преку работилницата спонзорирана од Американската национална фондација за наука во 1992 година. [33]. По испитување на проблемите во врска со управување на визуелни информации, учесниците заклучиле дека е можно сликите да имаат сè позначителна улога во електронските комуникации. Меѓутоа, значајни истражувања, вклучувајќи и соработка на одреден број на дисциплини, ќе бидат потребни за провајдерите на слики целосно да ги искористат понудените можности. Утврдени се некои области кои бараат натамошни истражувања претставување на податоци, извлекување на карактеристики и индексирање, барање на слики за совпаѓање (поврзување) и кориснички интерфејс.

Еден од главните проблеми кој е истакнат во споменатата работилница е тешкотијата при препознавање, лоцирање и извлекување на саканата слика од колекција на слики.

Главната алатка која помогна да го направи Интернетот универзално користен е машината за препознавање и пребарување на текст. Во типичните библиотеки базирани врз текст, алатките за пронаоѓање на барана информација се потпираат врз индекси на дескриптори. Дескриптори можат да бидат зборови или реченици. Тие можат да бидат и други податоци кои не се појавуваат во рамките на документот, како на пример, имиња на автори, издавачи, датум и слично. Дескрипторите на слики се сосема аналогни. Дескриптор на слики може да биде обичен текст. Дескриптори можат да бидат дигитални описи на сликата и можат да се состојат од податоци кои ги опишуваат боите, објектите, композицијата, текстурата или другите карактеристики на сликата.

Всушност, има неколку различни нивоа на претставување на слики кои можат да се искористат за пронаоѓање на конкретна слика и кои варираат од самите сликовни елементи до визуелната интерпретација на сликата. Една од тие техники користат најдетална претстава на сликата. Типични репрезентации од овој вид се нискорезолуциски верзии на оригиналната слика, кои можат да се добијат со мал број на операции по сликовен елемент. Меѓутоа, овие техники на

препознавање базирани врз сликовните елементи (пиксели, елементи на дигитализирана слика) се најсложени од пресметувачка гледна точка и мора да вршат обемни пресметувања за да утврди дали некоја слика одговара на дадено барање.

Техника која исто така може да се искористи за препознавање е базирана врз дескриптор. Дескрипторите на дадена слика, како на пример, хистограми на бои, информација за текстура, облик и слично, се поскапи од нискорезолуциските верзии на сликата, но тие работат многу побрзо.

На највисокото ниво на репрезентација на сликата којашто овозможува препознавање е информација базирана врз анализа на визуелната содржина на сликата. Таква репрезентација може да биде многу скапа, но таа овозможува препознавање базирано врз содржината на сликата кое би било комплицирано или невозможно со дескриптори на слика или со операции над сликовните елементи.

Како пример за различните нивои на индексирање може да послужи слика на човеково лице. Најниското ниво на репрезентација на сликата е претстава на лицето со сликовни елементи, најверојатно со ниска резолуција. На следното ниво со дескриптори сликата е опишана со бојата на кожата на лицето, текстурата на кожата и косата и обликот на лицето. Највисокото ниво, визуелното разбирање на сликата, го содржи името на личноста чијшто портрет е сликата. Денес препознавањето и пребарувањето на слики се вршат речиси исклучително со дескриптори, бидејќи техниките за визуелно разбирање на слика се нови и недоволно истражени, а цената на процесирање препознавања базирани врз сликовни елементи има тенденција да го надмине капацитетот на денешните компјутери.

Сликите имаат многу видови особини кои можат да бидат искористени во препознавањето и извлекувањето на слики, на пример:

- боја, текстура или форми (зелени ѕвезди);
- распоред на одредени видови предмети (столчиња околу маса);
- опис на настан (фудбалски натпревар);
- присуство на именувани поединци, настани, локации (премиерот го поздравува народот);

- субјективни емоции што можат да се поврзат со слика (среќа);
- метаподатоци како на пример кој ја креирал сликата, каде и кога.

Секој од горенаведените видови барања (освен последниот) претставува повисоко ниво на апстрактност отколку она што му претходи и на секое барање е потешко да се даде одговор без користење на надворешен систем на знаење. Ова природно води до класификација на видови барања во три нивоа, секое со сè поголема сложеност.

Ниво 1 опфаќа извлекување на карактеристики како што се боја, големина, текстура или просторен распоред на елементите на сликата. Примери на такво барање се: “најди слики со долги тенки темни предмети во горниот лев агол”, “најди слики кои содржат жолти ѕвезди кои формираат прстен” или најчесто “најди слики кои личат на дадената”. Ова ниво на извлекување користи карактеристики кои се директно изведени од самите слики без потреба да се користи некое надворешно знаење.

Ниво 2 опфаќа извлекување на изведени (понекогаш познати како логични) карактеристики кои вклучуваат одреден степен на логички заклучок за идентитетот на предметите опишани во сликата, на пример:

- а) извлекување на објекти од одреден вид (најди слики на автобус на два ката);
- б) извлекување на индивидуални објекти или лица (најди слика на Камениот мост).

За да се даде одговор на овие барања потребно е користење на надворешен извор на знаење посебно за поспецифичните барања од нивото 2 б. Во првиот пример, потребно е претходно разбирање за да се препознае предмет автобус од, на пример, предмет камион; во вториот пример треба да се знае дека на поедина структура и е дадено одредено име (Камен мост).

Ниво 3 опфаќа извлекување на апстракти особини кои бараат во значителна мера размислување на високо ниво и тоа за значење и намена на предметите и опишаните сцени. Ова ниво е поделено на:

- а) извлекување на именувани настани и видови на активност (најди слики од македонски народни танци);
- б) извлекување на слики со емоционално и религиозно значење (најди слики што опишуваат среќа).

Најраната и најмногу развиената машина за препознавање и извлекување на слики базирана врз дескриптор е IBM QBIC [19] лоциран на www.qbic.almaden.ibm.com.

Алатките базирани врз содржина постојано се развиваат и стануваат се пософистицирани. Пример за вакви алатки се WebSEEk (<http://www.ctr.columbia.edu/WebSEEk/>) и ImageRover [63]. ImageRover користи ниска резолуција за репрезентација на слика во шест региони со цел да бидат опфатени одредени информации заедно со дескрипторите за тие региони.

Сите овие техники ја унапредуваат точноста и корисноста на препознавањето на слики, и ќе доведат до многу помоќни комерцијални машини во иднина. Прецизноста на барањето има тенденција на подобрување со зголемување на резолуцијата на дескрипторите и со претпроцесирање на сликите за пронаоѓање на соодветни дескриптори.

Опишаните машини за препознавање и извлекување се потпираат врз компактна репрезентација на сликата со цел да се добие висока брзина на процесирање. Тие генерално немаат време да вршат анализа на сликите додека трае препознавањето и извлекувањето. Затоа тие настојуваат да инкорпорираат што е можно повеќе корисни информации во претставата на сликите, информации што можат да се стават на располагање кога тоа е потребно.

Техниките за препознавање базирани врз дескриптори се ограничени главно на два начина: тие не можат да дадат одговор за деталите на сликата или не успеваат да ги опфатат севкупните карактеристики во рамките на дескрипторите на слики. Големи комплексни слики можат да содржат многу детали така што нема да може да се најде соодветна компактна репрезентација.

Препознавањето базирано врз сликовни елементи подразбира пронаоѓање на одредена форма во дадена библиотека на слики. Некои параметри вклучени во постапката го специфицираат видот на препознавањето, имено дали

препознавањето се однесува на рабови, облици, боја, текстура или на други мерливи релации помеѓу сликите. Популарен критериум е нормализираниот корелациски коефициент, кој мери колкава е усогласеноста помеѓу дадена форма и слика од библиотека. Со овој критериум се отстранува осетливоста на униформни разлики во осветленоста. Друг често применуван критериум, сумата на квадрати на разликите, може исто така да биде пресметуван со техники на корелација.

Развиени се две независни и комплементарни техники за брзо пресметување на корелацискиот коефициент. Нивната комбинација резултира во забрзувања од 10 000 до 100 000 за типични случаи кога се споредува со пресметување на корелација базирана врз сликовни елементи. Ова е доволно препознавањето и извлекувањето на слики базирано врз сликовни елементи да постане остварливо за истражувачки цели денес и практично во комерцијална употреба во наредните години.

Првата техника го користи поимот нискорезолуциско препознавање. Le Moigne [45] ја применила оваа техника на сателитски слики користејќи го нискофреквенцискиот подопсег на вејвлет трансформацијата. Максималната вредност на корелацијата пресметана на најгруба резолуција се случува на позиција која одговара на иста релативна позиција на најфината резолуција. Со рафинирање на резултатот од грубата резолуција, преку барање на мал број можни точки во високорезолуциската слика, многу брзо може да се утврди усогласеноста помеѓу сликата и дадената форма на најфината резолуција. Ако препознавањето на груба резолуција не води кон добар кандидат, рафинирањето е непотребно и сликата се отфрла.

Втората техника е мултирезолуциската техника на Harold Stone [88] која вејвлет трансформацијата ја комбинира со Фуриеовата анализа. Вејвлет трансформацијата е погодна за ефикасна компресија, а Фуриеовата анализа на вејвлет трансформацијата овозможува да се добие брза корелација на сликата.

Мотивација и формулација на проблемот

За ефикасно извлекување на текст во различни јазици потребно е текстот да се подреди по азбучен редослед. Ова се применувало со векови, било рачно во класична библиотека или автоматски во модерна дигитална библиотека. Но кога доаѓаме до организирање на слики, човекот е незаменлив за повеќето задачи. Причината која ја прави оваа разлика е фактот дека текстот е креација на човек, додека сликите се репродукција на тоа што човекот го видел од неговото раѓање, и нивното конкретно опишување е нејасно. Природно е, интерпретацијата на она што е видено тешко да се карактеризира.

Сликите сè почесто се користат за пренос на информации во различни сфери како што се изработка на мапи, временски прогнози, маркетинг и други. Тие исто така, поради своите квалитети можат да бидат вреднувани и како уметнички дела.

Денес сликите се користат во многу професии. Примери за професионално користење на слики се:

- *Превенција од злочин* – Полицијата користи визуелни информации за да ги идентификува луѓето или да го сними местото на злочинот за собирање докази. Такви фотографии стануваат многу вредна архива. Во некои држави, вообичаена пракса е да се фотографира секој кој е уапсен и да им се земаат отисоци од прсти.
- *Медицина* – Медицината и другите професии поврзани со здравството користат и складираат визуелни информации во форма на рентгенски снимки, ултразвук или други скенографски слики за дијагнози и контроли. Постојат строги правила во врска со дискрецијата за такви информации. Сликите се чуваат во здравственото досие на пациентот, што воглавно се мануелни фајлови што се складираат по единствен идентификатор. Визуелните информации доколку се презентираат анонимно можат да послужат за истражувања како и во образовниот процес. Од посебен интерес се системи за ефикасна обработка на слики (на пример детекција на граници/карактеристики) кои му помагаат на општиот лекар во откривање и

дијагностицирање и следење на напредокот на рани и тумори.

- *Моден и графички дизајн* – Визуелната претстава е многу важна за графички, модни и индустриски дизајнери. Постојат индивидуални разлики во начините на кои дизајнерите им приоѓаат на нивните задачи. Многумина користат слики од претходни дизајни (проекти) во форма на слики, фотографии и графикони, како и предмети и други визуелни информации од реалноста.
- *Издавачка дејност и маркетинг* – Фотографиите и сликите се користат во издавачката индустрија за илустрирање во книги, колумни во весници и списанија. Многу национални и регионални издавачи на весници држат сопствени библиотеки на фотографии или ги користат оние што се достапни од здруженијата за печат. Маркетингот и рекламните кампањи во голема мера се потпираат на неподвижни и подвижни слики за промовирање на производи и услуги.
- *Архитектонски и инженерски дизајн* – Фотографии се користат и во архитектурата со цел снимање на завршени проекти, вклучувајќи слики од ентериер и екстериер на згради како и одредени карактеристики на даден проект. По традиција овие фотографии се складирани и се достапни по број на проектот или по име на проектот. Архитектите нив ги користат при презентирање на клиентите и при предавањата. Сликите што се користат во повеќе гранки во инженерството вклучуваат скици, планови, делови на машини и друго. Дизајн со помош на компјутер (CAD – Computer Aided Design) се користи многу во процесот на дизајнирање.
- *Историски истражувања* – Археолозите во своите истражувања во голема мера се потпираат на слики. Во некои случаи, визуелната документација може да биде единствениот достапен доказ. Збирките на фотографии и слајдови се одржувани од страна на широк спектар на организации меѓу кои и академски и државни библиотеки.

Сите претходно спомнати различни видови на слики поминале низ процесот на формирање на слика. Пример за тоа е кога се користи камерата и притоа сакаме снимена сликата да биде верна презентација на сцената што ја гледаме. Но секоја слика повеќе или помалку е замаглена. Така да процесот наречен реставрација на слика или одмаглување на слика е основен во добивање на слика која е јасна и корисна. Дигиталната слика е составена од елементи наречени сликовни елементи или пиксели.

Некое замаглување секогаш се појавува при снимањето на дигиталната слика, поради тоа што информациите за сцената се разливаат над соседните сликовни елементи. На пример, оптички систем на камерата може да биде надвор од фокусот, така што дојдовната светлина е размачкана. На истиот проблем се јавува и кај астрономските слики каде што дојдовната светлина во телескоп е незначително искривена од атмосферските турбуленции. Во овие и слични ситуации, резултат при снимањето е замаглена слика.

Главна цел на процесот на реставрација на слика е да се добие оригиналната слика со помош на математичкиот модел на процесот на замаглување. Клучното прашање е дека некои информации за изгубените податоци се навистина присутни во замаглената слика, но овие информации се скриени и може само да се обноват само ако се знаат деталите за процесот на замаглување.

Главни придобивки

Нашите истражувања во областа на реставрирање на слики, препознавање и извлекување на слики датираат од 1999 година, главно насочени кон методите за препознавање и извлекување на слики базирани врз сликовни елементи и на нивната можна примена.

Како резултат од овие истражувања развиен е алгоритам за препознавање и извлекување на слики базиран брз сликовни елементи. Исто така за зголемување на ефикасноста презентирано е решение за препознавање и извлекување на слики базирано истовремено врз содржина и врз сликовни

елементи Основната идеја е да се искористат добрите карактеристики при извлекување на обата пристапа – брзината на првиот и точноста на вториот.

Резултатите прикажани во дисертацијата се презентирани во следниве меѓународни научни списанија:

- I. Stojanovic, S. Bogdanova, M. Bogdanov, “Application of the Progressive Wavelet Correlation in Image Retrieving”, *Journal of Computer Science and Control Systems (JCSCS)*, ISSN 1844-6043, pp. 77-82, Vol. 3, Nr. 2, 2010.
- I. Stojanovic, S. Bogdanova, M. Bogdanov, and D. Taskovski, “Performance of the Progressive Wavelet Correlation for Image Retrieval”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, ISSN: 2070-3724, pp. 33-37, Issue 64, April 2010.
- I. Stojanovic, I. Kraljevski, S. Chungurski, “Using of the Algorithm of Lagrange Multipliers in Image Restoration”, *Journal of Electrical and Electronics Engineering (JEEE)*, ISSN 1844-6035, pp. 203-206, Vol. 3, Nr. 2, 2010.
- I. Stojanovic, S. Bogdanova, M. Bogdanov, “Applying of the Combination of Content-Based Search and Progressive Wavelet Correlation in Image Retrieving”, *Journal of Computer Science and Control Systems (JCSCS)*, ISSN 1844-6043, pp. 83-85, Vol. 3, Nr. 2, 2010.

Исто така резултатите се презентирани и на меѓународни научни конференции, од кои 3 се IEEE индексирани изданија:

- I. Stojanovic, M. Bogdanov, “Pixel-Based Searching of Images Stored in a Database”, *ICEST2006*, pp. 165-168, Sofia, Bulgaria, 29 June – 1 July 2006.
- I. Stojanovic, M. Bogdanov, S. Bogdanova “Searching of images stored in a database using content and pixel based methods”, *14th Telecommunications Forum*, pp. 486-489, Belgrade, Serbia, Nov. 21-23, 2006.
- I. Stojanovic, S. Bogdanova and M. Bogdanov, “Content-Based Image Retrieving Improved by Pixel-Based Search”, *14th IWSSIP2007 and 6th EC-SIPMCS2007*, pp. 395-398, Slovenia, Maribor, June 27-30, 2007,
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4381120 .

- I. Stojanovic, S. Bogdanova and M. Bogdanov, "Retrieving Images Using Content-Based Search and Progressive Wavelet Correlation", *ICEST2008*, pp. 121-124, Nis, Serbia, June 25-27, 2008.
- I. Stojanovic, S. Bogdanova and M. Bogdanov, "Retrieving Images Using Content-Based Followed by Pixel-Based Search", *15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, pp. 271-274, Bratislava, Slovak Republic, June 25–28, 2008, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4604419.
- I. Stojanovic, S. Bogdanova and M. Bogdanov, "Our experience with image retrieval using progressive wavelet correlation", *17th Telecommunications Forum*, pp. 944-947, Belgrade, Serbia, Nov. 24-26, 2009.
- I. Stojanovic, S. Bogdanova, M. Bogdanov, and I. Kraljevski, "Performance of the Hybrid Method of Image Retrieval", *ICEST2010*, pp. 199-202, Ohrid, Macedonia, June 23-26, 2010.
- I. Stojanovic, I. Kraljevski, S. Chungurski, "Applying of the Algorithm of Lagrange Multipliers in the Removal of Blur in Images", *ICEST2010*, pp. 203-206, Ohrid, Macedonia, June 23-26, 2010.
- I. Stojanovic, S. Bogdanova and M. Bogdanov, "Application of Non-Iterative Method in Digital Image Restoration", *18th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, pp. 235-238, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, June 16–18, 2011.

Методот наречен прогресивна вејвлет корелација (PWC – Progressive Wavelet Correlation), од класата методи базирани врз сликовни елементи, вклучува корелација во фреквенциски домен за брзо пресметување, факторизација на дискретна косинусна трансформација и вејвлет трансформација за ефикасна компресија [88]. Основната идеја се потпира на теоремата на Vaidyanathan за пресметување конволуција на сигнали претставени со нивната вејвлет-пакет трансформација [96]. Прогресивната вејвлет корелација ги обопштува резултатите на Vaidyanathan заменувајќи ја операцијата конволуција во доменот

на вејвлет трансформацијата со еквивалентни операции во Фуриеовиот фреквенциски домен.

Во овој метод корелацијата меѓу два сигнала се добива во нивниот оригинален домен без претходно враќање од доменот на трансформацијата во оригиналниот домен на сликата. Треба да се истакне прогресивната особина на методот: при премин од едно резолуциско ниво на пофино ниво пресметувањето на корелацијата не почнува од нула, туку се користат резултатите добиени во претходното погрубо резолуциско ниво.

Под терминот извлекување на слики базирано врз содржина (CBIR – Content Based Image Retrieval) се подразбира процес на извлекување на сакани слики од голема колекција на слики врз база на карактеристики кои можат автоматски да се добијат од самите слики, како што се боја, текстура и форма. По повеќе од една деценија интензивни истражувања технологијата CBIR е пренесена од лабораториите во производните хали на комерцијални продукти какви што се QBIC (Query by Image Content) и Virage.

Целта на дисертацијата е препознавање и извлекување на слика од колекција на слики, како и реставрирање на сликите. Пред нивно складирање во колекција на слики, ако е потребно се прави реставрација на слика. Во дисертацијата е презентираан метод за реставрирање на слики кој е базиран на Лагранжови множители. Исто така е дефинирана постапка за адаптација на методот прогресивна вејвлет корелација за препознавање и извлекување на слика од колекција на слики. Како што беше речено, овој метод за прогресивно пресметување на корелација меѓу два сигнала сугерира како тој може да се употреби за лоцирање на слика во дадена библиотека на слики. Меѓутоа, практичната примена на методот бара сликите да бидат сместени во база на податоци. Познато е дека, разгледувано од аспект на управливост, безбедност, резервна копија/реставрација, екстензибилност и флексибилност, сместувањето на слики во база на податоци има неспорни предности над фајл системот. Во дисертацијата е прикажано решение кое се состои од две фази. Иницијално ќе се користи методот базиран врз содржина. За конечната локација на бараната слика ќе се применува препознавање засновано врз сликовни елементи над мал број слики-кандидати добиени во првата фаза. Резултатот на вака

комбинираното препознавање е бараната слика, ако таа постои во колекцијата. Овој факт е од исклучителна важност во некои примени, да ги споменеме, на пример, медицинската дијагноза, заштитата на регистрирани патенти, заштитата на интелектуална сопственост, каде што не е дозволен одговор кој содржи повеќе од една слика.

Испитувањата се вршени врз слики превземени од CoreIDRAW Clip Art и од <http://wang.ist.psu.edu/docs/related.shtml>.

Организација

Основните поими врзани за извлекување на слики базирано врз содржина, како и различните три нивоа на развој во ова подрачје се формулирани во глава 1. Во втората глава е изложен методот прогресивна вејвлет корелација. Метод е заснован на теоремата на Vaidyanathan [96]. Опишано е како да се комбинира вејвлет-пакет трансформацијата со Фуриеовата трансформација за да се добие нултиот подопсег од циклична корелација помеѓу два вектора. Компонентите кои недостасуваат се пополнуваат со примена на мултирезолуциска анализа. Изложена е и факторизацијата на матрицата DCT врз која е базиран процесот на препознавање. Како мера за разлика помеѓу две слики се користат нормализирани корелационски коефициенти.

Во третата глава е даден нов метод за реставрирање на слики. Прикажана е системска архитектура на CBIR систем и е предложена системска архитектура на системот во чија основа е методот прогресивна вејвлет корелација. Исто така тука е изложен и предложениот хибриден алгоритам за препознавање и извлекување на слики, како и областите на неговата можна примена. Сите констатации се пропратени со експериментални и нумерички резултати.

На крајот се дадени заклучок и насоки за понатамошни истражувања.

Литература

- [1] *A Review of Image Search Engines*, Technical Advisory Service for Images, 2006.
- [2] H. C. Andrews and B. R. Hunt, *Digital Image Restoration*. Prentice Hall Inc., New Jersey, 1977.
- [3] S. D. Babacan, X. Yin, A. C. Larson, and A. K. Katsaggelos, "Combination of MR Surface Coil Images Using Weighted Constrained Least Squares", In *IEEE Int. Conf. Image Process. 2008*, San Diego, CA, October 2008.
- [4] M. R. Banham and A. K. Katsaggelos, "Digital image restoration", *IEEE Signal Process. Mag.*, 14(2): 24–41, 1997.
- [5] J. Biemond, R. L. Lagendijk, and R. M. Mersereau, "Iterative methods for image deblurring", *Proc. IEEE*, 78(5):856–883, 1990.
- [6] T. E. Bishop, S. D. Babacan, B. Amizic, A. K. Katsaggelos, T. Chan, and R. Molina, *Blind image deconvolution: problem formulation and existing approaches*, In P. Campisi and K. Egiazarian, editors, *Blind Image Deconvolution: Theory and Applications*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
- [7] A. Bovik, *The essential guide to the image processing*, Academic Press, 2009.

-
- [8] V. Castelli *et al.*, “Progressive classification in the compressed domain for large EOS satellite databases,” *Proc. ICASSP '96*, vol. 4, pp. 2199–2202, Apr. 1996.
- [9] G. Chantas, N. P. Galatsanos, and A. Likas, “Non stationary Bayesian image restoration. In *Proc. Int. Conf. Pattern Recognit.*, Vol. 4, 689–692, August 23–26, 2004.
- [10] S. Chaudhuri, editor, *Super-Resolution Imaging*, Kluwer Academic Publishers, New York, 2001.
- [11] S. Chountasis, V. N. Katsikis, D. Pappas, “Digital Image Reconstruction in the Spectral Domain Utilizing the Moore-Penrose Inverse”, *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2010 (2010).
- [12] S. Chountasis, V. N. Katsikis, and D. Pappas, “Applications of the Moore-Penrose Inverse in Digital Image Restoration”, *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2009 (2009).
- [13] P. L. Combettes, “The foundation of set theoretic estimation”, *Proc. IEEE*, 81:182–208, 1993.
- [14] *Database Toolbox User's Guide*, The Math Works, Inc., Natick, MA, 2005.
- [15] G. Demoment, “Image reconstruction and restoration: overview of common estimation structures and problems”, *IEEE Trans. Acoust.*, 37(12):2024–2036, 1989.
- [16] J. P. Eakins (1996) “Automatic image content retrieval – are we getting anywhere?” *Proceedings of Third International Conference on Electronic Library and Visual Information Research (ELVIRA3)*, De Montfort University, Milton Keynes, pp 123-135.
- [17] P. Enser, Y. Kompatsiaris, N. E. O'Connor, A. F. Smeaton, A. W. M. Smeulders, *Image and Video Retrieval*, Springer, 2004.
- [18] A. M. Eskicioglu and P. S. Fisher, “Image Quality Measures and Their Performance,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, pp. 2959-2965, Dec. 1995.

-
- [19] M. Flickner et al., "Query by image and video content: The QBIC system," *IEEE Comp.*, vol. 28, pp. 23-32, Sept. 1995.
- [20] N. P. Galatsanos and R. Chin, "Digital restoration of multichannel images", *IEEE Trans. Signal Process.*, 37: 415–421, 1989.
- [21] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 2nd Edition, Prentice-Hall, 2002.
- [22] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, S. L. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*, Prentice-Hall, 2003.
- [23] V. N. Gudivada and V. V. Raghavan (1995a) "Content-based image retrieval systems" *IEEE Computer* 28(9), 18-22.
- [24] A. Gupta et al (1996) "The Virage image search engine: an open framework for image management" in *Storage and Retrieval for Image and Video Databases IV*, Proc SPIE 2670, pp 76-87.
- [25] T. Hermes et al (1995) "Image retrieval for information systems" in *Storage and Retrieval for Image and Video Databases III* (Niblack, W R and Jain, R C, eds), Proc SPIE 2420, 394-405.
- [26] R. Holowczak, Baruch College City Univeristy, F. Artigas, Rutgers University, S.A. Chun, Rutgers University, J.S. Cho, Rutgers University and H.S. Stone, NECI, "An Experimental Study on Content-Based Image Classification for Satellite Image Databases", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(6):1338-1347, 2002.
- [27] T. Huang et al (1997) "Multimedia Analysis and Retrieval System (MARS) project" in *Digital Image Access and Retrieval: 1996 Clinic on Library Applications of Data Processing* (Heidorn, P B and Sandore, B, eds), 101-117. Graduate School of Library and Information Science, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [28] B. R. Hunt, "The application of constrained least squares estimation to image restoration by digital computer", *IEEE Trans. Comput.*, 2:805–812, 1973.

-
- [29] *Image Processing Toolbox User's Guide*, The Math Works, Inc., Natick, MA, 2009.
- [30] E. Izquierdo, *State of the art in content-based analysis, indexing and retrieval*, Public deliverable D2.1_V2, IST SCHEMA project, www.schema-ist.org, 2003.
- [31] C. E. Jacobs et al (1995) "Fast Multiresolution Image Querying" *Proceedings of SIGGRAPH 95, Los Angeles, CA* (ACM SIGGRAPH Annual Conference Series, 1995), 277-286.
- [32] A. K. Jain, "Advances in mathematical models for image processing", *Proc. IEEE*, 69(5):502–528, 1981.
- [33] R. Jain (1993) "Workshop report: NSF Workshop on Visual Information Management Systems" in *Storage and Retrieval for Image and Video Databases* (Niblack, W R and Jain, R C, eds), Proc SPIE 1908, 198-218.
- [34] F. Jeng and J. W. Woods, "Compound Gauss-Markov random fields for image estimation", *IEEE Trans. Signal Process.*, 39:683–697, 1991.
- [35] M. G. Kang and S. Chaudhuri, editors, "Super resolution image reconstruction", *IEEE Signal Process. Mag.*, 20(3), 2003.
- [36] T. Kato (1992) "Database architecture for content-based image retrieval" in *Image Storage and Retrieval Systems* (Jambardino, A A and Niblack, W R , eds), Proc SPIE 1662, 112-123.
- [37] A. K. Katsaggelos, R. Molina, and J. Mateos, *Super Resolution of Images and Video*, Morgan and Claypool, San Rafael, CA, 2007.
- [38] A. K. Katsaggelos, editor, *Digital Image Restoration*, Springer Verlag, New York, 1991.
- [39] A. K. Katsaggelos, "Iterative image restoration algorithm", *Opt. Eng.*, 28(7):735–748, 1989.
- [40] J. Kovacevic and R. F. Murphy, "Molecular and cellular bioimaging" [Guest editorial], *IEEE Signal Process. Mag.*, 23(3):19–19, 2006.

-
- [41] D. Kundur and D. Hatzinakos, "Blind image deconvolution: an algorithmic approach to practical image restoration", *IEEE Signal Process. Mag.*, 13(3):43–64, 1996.
- [42] R. L. Lagendijk and J. Biemond, "*Iterative Identification and Restoration of Images*", Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1991.
- [43] R. L. Lagendijk, J. Biemond, and D. E. Boekee, "Identification and restoration of noisy blurred images using the expectation-maximization algorithm", *IEEE Trans. Acoust.*, 38:1180–1191, 1990.
- [44] R. L. Lagendijk, A. M. Tekalp, and J. Biemond, "Maximum likelihood image and blur identification: a unifying approach", *Opt. Eng.*, 29(5):422–435, 1990.
- [45] J. Le Moigne, "Parallel registration of multi-sensor remotely sensed imagery using wavelet coefficients," *Proc. SPIE O/E Aerospace Sensing, Wavelet Appl.*, pp. 432–43, Apr. 1994.
- [46] J. S. Lim, *Two-Dimensional Signal and Image Processing*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1990.
- [47] W. Y. Ma and B. S. Manjunath (1997) "Netra: a toolbox for navigating large image databases" *Proc IEEE International Conference on Image Processing (ICIP97)*, 1, 568-571.
- [48] *MATLAB External Interfaces*, The Math Works, Inc., Natick, MA, 2005.
- [49] *MATLAB Getting Started with MATLAB*, The Math Works, Inc., Natick, MA, 2005.
- [50] *MATLAB Web Server User's Guide*, The Math Works, Inc., Natick, MA, 2005.
- [51] D. Mery, D. Filbert, "A Fast non-Iterative Algorithm for the Removal of Blur Caused by Uniform Linear motion in X-Ray Images", *15th World Conference on Non-Destructive Testing, Computer Processing and Simulation*, Rome, 15-21 October 2000.

-
- [52] T. Minka (1996) "An image database browser that learns from user interaction" MIT Media Laboratory Technical Report #365.
- [53] R. Molina, J. Abad, M. Vega, and A. K. Katsaggelos, "Parameter estimation in Bayesian high resolution image reconstruction with multi sensors", *IEEE Trans. Image Process.*, 12(12):1642–1654, 2003.
- [54] *Multimedia Systems and Content-Based Image Retrieval*, Sagarmay Deb, University of Southern Queensland, Australia, 2004.
- [55] C. Nastar et al (1998) "Surfimage: a flexible content-based image retrieval system" presented at *ACM Multimedia '98*, Bristol, UK.
- [56] W. Niblack et al (1998) "Updates to the QBIC system" in *Storage and Retrieval for Image and Video Databases VI* (Sethi, I K and Jain, R C, eds), Proc SPIE 3312, 150-161.
- [57] Oracle Database Application Developer's Guide - Large Objects, 10g Release 1 (10.1), 2003.
- [58] Oracle Database JDBC Developer's Guide and Reference, 10g Release 1 (10.1), 2003.
- [59] Oracle *interMedia* User's Guide, 10g Release 1 (10.1), 2003.
- [60] A. Pentland et al (1996) "Photobook: tools for content-based manipulation of image databases" *International Journal of Computer Vision* 18(3), 233-254.
- [61] F. Rabbitti and P. Stanchev (1989) "GRIM_DBMS: a graphical image database management system" in *Visual Database Systems* (Kunii, T, ed), Elsevier, Amsterdam, 415-430.
- [62] Y. Rui et al (1997) "Relevance feedback techniques in interactive content-based image retrieval" in *Storage and Retrieval for Image and Video Databases VI* (Sethi, I K and Jain, R C, eds), Proc SPIE 3312, 25-36.
- [63] S. Sclaroff, L. Taycher, and M. La Cascia, "Imagerover: A content-based image browser for the world wide web," *IEEE*

- Wksp. Content-Based Access of Image and Video Libraries*, pp. 2–9, June 1997.
- [64] C. A. Segall, A. K. Katsaggelos, R. Molina, and J. Mateos, "Bayesian resolution enhancement of compressed video", *IEEE Trans. Image Process.*, 13(7):898–911, 2004.
- [65] J. L. Semmlow, *Biosignal and Medical Image Processing: MATLAB-Based Applications*, CRC, 2004.
- [66] *Signal Processing Toolbox User's Guide*, The Math Works, Inc., Natick, MA, 2005.
- [67] E. Silva, K. A. Panetta, S. S. Agaian, "Quantify similarity with measurement of enhancement by entropy," Proceedings: *Mobile Multimedia/Image Processing for Security Applications*, SPIE Security Symposium 2007, Vol. 6579, Paper #6579-0U, Orlando, FL, April 2007.
- [68] J. R. Smith and S. F. Chang (1997a) "Querying by color regions using the VisualSEEK content-based visual query system" *Intelligent Multimedia Information Retrieval* (Maybury, M T, ed). AAAI Press, Menlo Park, CA, 23-41.
- [69] J. R. Smith and S. F. Chang (1997b) "An image and video search engine for the World-Wide Web" in *Storage and Retrieval for Image and Video Databases V* (Sethi, I K and Jain, R C, eds), Proc SPIE 3022, 84-95.
- [70] H. Stark and J. W. Woods, *Probability, Random Processes, and Estimation Theory for Engineers*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1986.
- [71] I. Stojanovic, M. Bogdanov, "Location of Objects in a JPEG Image with Progressive Wavelet Correlation using Fourier methods", *9th Telecommunications Forum*, pp. 561-564, Belgrade, Yugoslavia, Nov. 20-22, 2001.
- [72] I. Stojanovic, M. Bogdanov, D. Taskovski, "Pixel-Based Searching for Object Location in a JPEG Image", *MELECON*

- 2002-11th *Mediterranean Electrotechnical Conference*, on CD-ROM, Cairo, Egypt, May 7-9, 2002.
- [73] I. Stojanovic, D. Taskovski, I. Kraljevski, "Normalized Correlation Coefficients for Searching JPEG Images", *7th IT' 02*, pp. 104-107, Zabljak, Yugoslavia, 24 Feb. - 2 Mar., 2002.
- [74] I. Stojanovic, M. Bogdanov, "Pixel-Based Searching of Images Stored in a Database", *ICEST2006*, pp. 165-168, Sofia, Bulgaria, 29 June – 1 July 2006.
- [75] I. Stojanovic, M. Bogdanov, S. Bogdanova "Searching of images stored in a database using content and pixel based methods", *14th Telecommunications Forum*, pp. 486-489, Belgrade, Yugoslavia, Nov. 21-23, 2006.
- [76] I. Stojanovic, S. Bogdanova and M. Bogdanov, "Content-Based Image Retrieving Improved by Pixel-Based Search", *14th IWSSIP 2007 and 6th EC-SIPMCS 2007*, pp. 395-398, Slovenia, Maribor, 27-30 June, 2007.
- [77] I. Stojanovic, S. Bogdanova and M. Bogdanov, "Retrieving Images Using Content-Based Search and Progressive Wavelet Correlation", *ICEST2008*, pp. 121-124, Nis, Serbia, June 25-27, 2008.
- [78] I. Stojanovic, S. Bogdanova and M. Bogdanov, "Retrieving Images Using Content-Based Followed by Pixel-Based Search", *15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, pp. 271-274, Bratislava, Slovak Republic, June 25–28, 2008.
- [79] I. Stojanovic, S. Bogdanova and M. Bogdanov, "Our experience with image retrieval using progressive wavelet correlation", *17th Telecommunications Forum*, pp. 944-947, Belgrade, Serbia, Nov. 24-26, 2009.
- [80] I. Stojanovic, S. Bogdanova, M. Bogdanov, and D. Taskovski, "Performance of the Progressive Wavelet Correlation for Image Retrieval", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, ISSN: 2070-3724, pp. 33-37, Issue 64, April 2010.

- [81] I. Stojanovic, I. Kraljevski, S. Chungurski, "Using of the Algorithm of Lagrange Multipliers in Image Restoration", *Journal of Electrical and Electronics Engineering (JEEE)*, ISSN 1844-6035, pp. 203-206, Vol. 3, Nr. 2, 2010.
- [82] I. Stojanovic, S. Bogdanova, M. Bogdanov, and I. Kraljevski, "Performance of the Hybrid Method of Image Retrieval", *ICEST2010*, pp. 199-202, Ohrid, Macedonia, June 23-26, 2010.
- [83] I. Stojanovic, I. Kraljevski, S. Chungurski, "Applying of the Algorithm of Lagrange Multipliers in the Removal of Blur in Images", *ICEST2010*, pp. 203-206, Ohrid, Macedonia, June 23-26, 2010.
- [84] I. Stojanovic, S. Bogdanova, M. Bogdanov, "Application of the Progressive Wavelet Correlation in Image Retrieving", *Journal of Computer Science and Control Systems (JCSCS)*, ISSN 1844-6043, pp. 77-82, Vol. 3, Nr. 2, 2010.
- [85] I. Stojanovic, S. Bogdanova, M. Bogdanov, "Applying of the Combination of Content-Based Search and Progressive Wavelet Correlation in Image Retrieving", *Journal of Computer Science and Control Systems (JCSCS)*, ISSN 1844-6043, pp. 83-85, Vol. 3, Nr. 2, 2010.
- [86] I. Stojanovic, S. Bogdanova and M. Bogdanov, "Application of Non-Iterative Method in Digital Image Restoration", *18th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, pp. 235-238, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, June 16-18, 2011.
- [87] H. S. Stone, "Image Libraries and the Internet," *IEEE Commun. Magazine*, pp. 99-106, Jan. 1999.
- [88] H. S. Stone, "Progressive Wavelet Correlation Using Fourier Methods," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 47, pp. 97-107, Jan. 1999.
- [89] H. S. Stone and T. Shamon, "The use of image content to control image retrieval and image processing," *Int'l. J. Digital Libraries*, vol. 1, no. 4, pp. 329-43, Dec. 1997.

-
- [90] H. S. Stone and R. Wolpov, "Blind Cross-Spectral Image Registration Using Prefiltering and Fourier-Based Translation Detection", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(3):637-650, 2002.
- [91] H.S. Stone, E.C. Chang, and S.A. Martucci, "A Fast Direct Fourier-Based Algorithm for Subpixel Registration of Images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(10):2235-2243, 2001.
- [92] H.S. Stone, J. Le Moigne, and M. McGuire, "The Translation Sensitivity of Wavelet-Based Registration", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21(10):1074-1081, 1999
- [93] G. Strang and T. Nguyen, *Wavelets and Filter Banks*, Wellesley-Cambridge Press, 1996.
- [94] I. E. Sutherland. *SKETCHPAD: A Man-Machine Graphical Communication System*. PhD thesis, MIT, 1963.
- [95] A. M. Tekalp, H. Kaufman, and J. W. Woods, "Identification of image and blur parameters for the restoration of non-causal blurs", *IEEE Trans. Acoust.*, 34:963–972, 1986.
- [96] P. P. Vaidyanathan, "Orthonormal and biorthonormal filter banks as convolvers, and convolutional coding gain," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 41, pp. 2110-2130, June 1993.
- [97] P. P. Vaidyanathan, *Multirate Systems and Filter Banks*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1993.
- [98] G. K. Wallace, "The JPEG still-picture compression standard," *Commun. ACM*, vol. 34, no. 4, pp. 30-44, Apr. 1991.
- [99] Z. Wang and A. C. Bovik, "Mean Squared Error: Love It or Leave It? A New Look at Signal Fidelity Measures", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 26, no. 1, pp. 98-117, Jan. 2009.
- [100] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural

- similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, Apr. 2004.
- [101] *Wavelet Processing Toolbox User's Guide*, The Math Works, Inc., Natick, MA, 2005.
- [102] J. W. Woods and V. K. Ingle, "Kalman filtering in two-dimensions – further results", *IEEE Trans. Acoust.*, 29:188–197, 1981.
- [103] Y. L. You and M. Kaveh, "A regularization approach to joint blur identification and image restoration", *IEEE Trans. Image Process.*, 5:416–428, 1996.
- [104] Y. L. You and M. Kaveh, "Blind image restoration by anisotropic regularization", *IEEE Trans. Image Process.*, 8(3):396–407, 1999.