Bag-of-Words Computer Vision Methods for Forensic Applications

February Fourier Talks The Norbert Wiener Center for Harmonic Analysis and Applications University of Maryland February 18, 2011

Jeff Woodard MITRE CORP, McLean, VA

Approved for Public Release: 10-4252 Distribution Unlimited



© 2011 The MITRE Corporation. All rights reserved

1

Problem addressed

Forensic & biometrics: writer identification

Strengthening Forensic Science in the United States: A Path Forward (National Academies report, 2009):

- Computer studies suggest a scientific basis for handwriting comparison, at least in the absence of intentional obfuscation or forgery
- The scientific basis for handwriting comparisons needs to be strengthened



Summary of Past Automated Studies

Strongly influenced by human document examiners



Limited publically available reports and data bases

Often manual supervision or preprocessing needed

Features are linguistic and/or geometrically based

Initial Processing





Bag-of-Words Approaches

Popular in computer vision applications:

- Object recognition & detection
- -Video tracking
- Other biometrics, e.g. face, iris, fingerprint



Bag-of-words methods:

- Do not measure classical document features
- Instead, extract "local features" to model local shape
- Are completely automated and unsupervised



Bag of Words Algorithmic Components

Local Features: Scale Invariant Feature Transform(SIFT)

Vector Quantization (VQ)

Either:

- probabilistic Latent Semantic Analysis (pLSA)
- Spatial Pyramid Matching







Local Features

Local Features Popularized by D. Lowe, U. British Col.

Represent distinctive shapes of small regions without segmentation



Local Descriptor

Figure credit: adapted from Torralba. MIT

Moderately invariant or robust to: Rotation, Scale, Viewpoint, Noise, Occlusions



Local Features: Invariance







Lowe's Scale Space

- **Laplacian of Gaussian provides scale invariance**
- Approximate with Difference of Gaussians (DoG)

 $\sigma(s, o) = \sigma_0 \cdot 2^{(s/S+o)}, \text{ DoG }_{(o,s)} = I_{o(o,s+1)} - I_{o(o,s)}$

$$\sigma_0 = 1.6, s = 0, \dots, S - 1, o = o_{\min}, \dots, o_{\min} + O - 1$$

s : # of scales per octave, O : # of octaves

Adapted from A. Torralba, MIT, 2010



Seele 1			Ce Scale 4	Scalo 5	
Jerit Blend, a list of and forthe perfored that the is and perfored that the is here we the same & for open as indistance the that the times at common such a t Nation, breating Neground a here proceedings in keck to perforety; and it was	gette Bland, a list of an press, and proposed that the with the proposed that the with the provide the come & far anged as indistance the kent all times at control such a of Nation, breaking Napour as her provides; and it was	States	State 4 and the Bland, a list of have many and perform that the s of here and the second that the anged as introduced that all times of control back as of Matine, have in Magnuck so their here adongs in hard a to here and going in how		Octave 1
the second a second sec	a fair an ann an Anna an Anna an Anna an Anna an Anna An An Anna Anna				Octave 2
$ \begin{bmatrix} \int_{a} \int$	a a di Jana (a di sec				Octave 3
- f Mr. 18 hand, a list etc, and proposed that I to process the same roged as indispensation all traines at concerns of eventions, breating A contrain proceedings in the two proposed sings in the two proposed is prove to prove to come to prove to pro- te to proposed is a mode in the proposed is a mode in the indistance of a set to mode it man to come to a set to mode to it man to come to a set to mode to it man to come to a set to mode to it man to come to a set to a set to mode it man to come to a set to a set to mode to it man to come to a set to a set to mode to it man to come to a set to a set to mode to it man to come to a set to a set to a set to a it man to a set to a set it man to a set to a set to a set to a set to a set it man to a set to a set it to a set to	i of bootin of Mr. Bland, I The first, and perfore . In fair it to persone the le that would be persone the such a all times of a regracit of vections, break . had a contain proceeder to would be to propriety; . that to me an an and the such a set to propriety; . that to me an an and the mark of a set of a s	a list of boots of lot 13 l 3 that the suit and per conside that any 2 as in men such a all times this Negrecule of Nations and it was be to proper	end, a list of two of for opened that the second of the second to fail to be disferently had a fail at control lack a all b prestings in keek and he isty; and it was a to	to to band, a bot of two and particual that the assess the second to fait as independent that taise at contine such i atoms, heating to be have ably and it was	Find Extrem

13 reserved

Local Features

Circle center: feature x-y position Circle radius: feature scale Circle arrow: dominant orientation(s)

on(s) **DoG-SIFT features**

ارْنَبَ السّهاد من عَوى الماران نجيش مع يلال ترباب مم يستانه توبت عرب معد قريا الزرعة بالتعاج ، مُعَوج مغرى من المزرعة دب عامد الذي يعرب فراح مستر القوية مرح من المزرعة دب عامد الذي مسمر يركيان المرس وشاكر يقلف المشعني، ومادق يقعن القعم والفضاح يقول لغة المهند ما أعدوما غيها مع ماني

Original Image

مؤهل برب القطام رمانط خنتج علمة الظاهر والعيوز تماكل الحنب والنفتع . بخادة تلبى مصاغها والببكار تقفل نفريد ، " أين تهراشه حفاف واين يقرح تاسم وطاري ومن اكل كحك كونتر ؟ وسابر خليل ببج محمد ميزان تقام وناى حنان والصاف يدى شاد ومياد والوامى يبعث مدلؤلتر . رسميد يكتب لغادى وقط ممال هرب منذ الصباح ومنابط كنب البلاغ وفيان شابرى تما لبعثى معاطر. الصاب . أن البرتيل كام حف ومرى .







MITRE

Vector Quantization

Vector Quantization (VQ)

i.e., K-means, Generalized Lloyd clustering

Hierarchical or tree-structured for speed

Many different local descriptors quantized to small codebook -- "visual words"

Encode each visual word with unique index

Images characterized by histogram of indexes



VQ "VISUAL WORDS"

100 random image regions from Arabic, DoG detector, SIFT descriptor, 512 codewords

Region sizes vary: all displayed identically

Regions for VQ codeword 1



Regions for VQ codeword 2



Regions for VQ codeword 3





"Visual words" represent fundamental properties associated with early to middle vision

© 2011 The MITRE Corporation. All rights reserved

Bag of Words Representation



MITRE

© 2011 The MITRE Corporation. All rights reserved

Classification by pLSA

Hofmann, T. (2001), Unsupervised Learning by Probabilistic Latent Semantic Analysis, *Machine Learning Journal*, 42(1), 177:196.

Sivic, J., Russell, B., Efros, A., Zisserman, A., & Freeman, W. (2005), Discovering object categories in image collections, *MIT AI Lab Memo AIM-2005-005*.

probabilistic Latent Semantic Analysis (pLSA):Text Documentsdocuments modeled as combinations
of latent topics



pLSA for Images

images modeled as combinations of latent objects



probabilistic Latent Semantic Analysis (pLSA)







retrieved class
$$d^* \equiv \arg \max_{j} \{ sim(d_i, d_j) \}$$

© 2011 The MITRE Corporation. All rights reserved

24

اً رئ اً سام ما أقوى الأرائب يعيث موجل رباب من مستارد توريد ترويد شلف ثموا مذير تن دين ه المعد بالثرب من صابية -عد المزروعة بالتناج. وطوخ وتما المزيقة وب حامد الذي يدرب ورامح مندر رفت المذهبة حب عامد الشبع من عن مذكر لما بر معرضة العضية مربع عام سريعا ما مذكر لما بر معرضة وحداثة يتباع المدحد راحية وتبليا منا العناسين. وحداثة منا المعام المعام المن المنا النائية والمعام المستر عدائل والمعاد تكم العنب النائية وما مستر عدائل والمعاد تكم العنب المناطق وما المعاد راحية عام وعاد تمام وتبلي من كم العد كان وما من على وحد ما ما والم قام راحي عن والما والم بية مَنْ وَ وَمِيَاً وَالدَاوَيَ بِيَرْتُ عَلَى الْمُؤْكُ ، مِسْمَعِ لَكْتُبُ لِمَا دِي مِرْحَظَ جَالَ حَرْبِ مِنْدَ العَاجِ وَحَالَ خُلُ كتب العلاقي رضاحي شارلت خوامت مح ككيرات. دعوالدي جريح فنط منتا ست الحند، خراست العريان. ستريع مطاطر (لصاحن مزامت اللعام بعريست ، محق الملف الدبانج والدقات برعامية المحكات اسر الرتيسة آسعًا وحرى .

5

4.6.

مالواديه يبعث فأالألا . دسير يكتب الناوجه وتنفه حيان التحديثة . كمانا أقلك النباغ الاقات بدحايث المكاكئ . لان الدليسي آسف ريزي.

يوريخانع عالمة الملية وريه عام سريريا في منزل ويار. موسوف حسابي بركيارا الغرس ماتكر يشعيت العصيس رزور بشرور التسبين والمحتمع يتمان فقة المفتلا سا الملاص فهي على حاضي والالان ركب القتله وحافقة المام الرف القابو مالجوز تأكل العنب بالنامغ ، مغارة للبس ساخيا مالجوز تأكل العنب بالنامغ ، مغارة للبس ساخيا مالينكه القرل الغرير ، أنية اما ساعاته، ماين بقوة المسم رویسه مین اکل کمکته کوارج " دوسان خلیل بیجت، می مهارف مذر اکل کمکته کوارج " دوسان خلیل بیجت، می مهزان شیام مرتاح هنان د افداف بوت بیده میاه صب أنتذ السجاح محابط كتب البلام منياحى شارك نحيا اجست مه البيران ، متم الدجاج في فح فنامت التميز ، ما ين المريق بقريط ألماط العذائية تراب اللا

10

بیسن می اولد دستیر بیش منهوست بیش میش من اصب می منابع اسم اسم می می مادن می اسب می ایونان مرکم اصبا می می مان مان ایند. استین که مان میک می ایونان می میک ایک ایک از الالیس اسم استان میکند. از الالیس اسم ا

کحکہ کوئر ؟ وَاسْنَ عَلِيلَ بِيسَتُ حَنْ بِيرَانَ قَبْلَ وتان جناب والبناق يدق فيدلا مسياه مالادي يبعث عن لذاذ . و سيو بكتب اناديه يتعه جال عرب

ارت احار لما المعان السرائي بعيت م بابل كم يستاذ مربع حامد الآبي بوريده فاراع سندر الغوية مربع عن سويرما كالذك ذياد رسيعنا رسامي بركبان الغرسى مشكر يشيف شرائية حنات رابي يتمده فاس وطارت رمن اكل

العالة الرب بتلك الريا المثيه فما سجاج أصد بالثرب م حديثة سعد المزدرجة بالثغام ، وضع أهديه وفي المزرجة الكسيسان ، وحارف يتمس الشمصي والتفعل بقدل لله النتار بها العلاجا فيبيءا فعلى سامي معلدي رقيم القطار معاتقه بنم غذت المقاحر والجعيز تأكل العنب والنفع وغامته للبس عمائفها والبعاء المقول شخريد والينغ

م تع المعالي التي تناقيل والم المعيد تربط ما ط المناه حراف المع العرب عد جلك ومع المرعام مرد وطلك الم وروط

46

رب السبعات الموالي دائبا بعيسم عاجل ولاينة الميكام فوكان فلكف الرواد والم الدونية المية والترد مدعية معر المتدم القال والمؤلو الأر ری وی مردمی ایر وی بر وی فرد و حالد این در دارم مدر این در این درم محصوص میرمی و مارد در و مهمه در سام برکیه برمی درم میشد خشونی د ماهد نيب المندم ، المعنوع ميتول له المعاد ما ايدها منها تعل مان، فعال كه المثل , ماتل في المن , المرد تا م ر العلية و المعلية و عاده عليمة و مانا لا و المعاد و المار المار الم مرا المست عاماً و الم الموقر عاسم و عاردو رساعي كما كم تر و مسام خلق معینة مدخیران خاكار زمان حاضام و الموت مبدر تور مربعه کرداده این امریک مراکز از مسلم مراکز با این مسلم میان مربعه کرداده این این این کوان اسلم همه یکی که مانکه میان همه به کردیم اروزار که کمیکویکی و مؤدمه مارکل این میان با طبرا م

شعة رعاله طرب تبد المعباج وخاجط كتما البقغ وفياخا شارك ي الحت ج الجيران. وقع الدباع في فيخ خاب الجز، فَأَشَ الأَحْتُ شريط مطاط المناحد ترات اللغة العربية الماد لذلك الدياة برجلية المكالث، بإذ الرئيس آست وبرئ **46**

Ranked left-to-right, top to bottom

ارزب السبارس أتون الاراب يعيث جابل رباب فريستان

تون أوب بثان ثربا وفيعاتها وماع أسجد بالغرب ما حديقة

. سيس المزرد معة با الناح . صفوغ فحرى، و في المزرعة مب حامد بالذي يسبعا لاراع سندر العوية ورجم على حربرها فيا ختل زباء وسامجا إمركياته الغرمة وشاكرا فيقلف لتشمش المعمامة ينفعا التصفه ميسدن وسامي يركبا نه الفرس وشاكر مشطف الشمش وصادقه بشن الشمحاء والشغارع يقول لغة المقادما أجلدها فيها خل والشذيع يتول لتبة المناد بالمعلاها فيها تعل سافي وطلال باحيه وخلدته دكب الشطار مساخط أمخ ظرف الفلاه و الجرز أكمل ركب المتغار وبالمنظ فخ الخرت النظاحي والمحود تأكل النتب لمت والتعليم، وغامة اللبان المعاغلة والبطاء القول الوبدة * أين الالتحذوب ولغامنا تنسبو ليصاغها والسفاء كشبارتة بسرواه لأمن فرابشته أسفا فب وأبينه بعثيه تعاسم مطارف وحيرة كل كعكنه كموترز أ افرا شته الحباط: الداية بطرة تماسم المالية والد إلى كوكية كوائر ؟ " والساد نتايل بجب منوية أنداعام ونافيهمنان والفاتس يرق والسبان الشليل بجث الايت أن تحام وتاليه حتال والهاتيت يسان تعاد فهام ماياه والوادية بجث عنالقاف وسير يكتب لهادي وأبياء والعادي بجث حاطاة والميريك تناوي وكطحال

المزرعة بالتناع. وخرع تخرك وفي الزرعة وبحادر إلذي بهديعه فداع متنذة فتقرية ووهم علما سريرجا فيأرزل دباد والبسون

حرب نند المصبلح وضابط كبت البلاغ رفياض تسارك يو البون

يع الجيران ، متي الدِّتاع فيه تح منات الخبر . فما سُم، المريحين

- شريط مطاط - السنا من وإت الله الكربية . كان الملك

الدباغ الدمان بريعايته المكالث. إن الزَّس آست وموناً.

لدت قرب عث ويا وفيدت وجايع أعجد بالغرب من مدعة سر

ارديه اسماء ما أخرى الأراغبارميش مع بلط رباب في إستان

pLSA Object "Discovery"

29

أونيه أصله من أعوى الرقد، بعنها ميرابل رقبه إن معتلي ذين توب علمات قومًا. 199 رضا في مشهر لمد بالتي، من عدينة مني المزرمة بالتباق، وغير فتوي 19 المزيق دب عامد الذي يدرد قول عنو الفورة وزم علي سوونا في متيويوان

ر به البري الاستساحة بدرت من حوال عليه المعاني المحمدين . وجمعه رحان لايان النوي رقبان يدعن المحمدين - رحادق يقص القصص والمناديع بعول البه النار ما أدادة فيه نيل مانيع وطائل رك التقار وطائط

طرف ألطاني والسبورتائكل الننده والتنتع ومادكا تأنهن سط مصافنا والبنقأه تقزل

يممله من ميوان تشام وناي مذان راليات بدق نقاء وحياء أوقوادي ويبعث من نوبوا

يممك ما، مواد شام رداي مذان را الاطف بدن نام رحاء رادان بر دينه من بوت راحو تريند اشام ومطنيق من سنة المراج و مارساكنن الدانج مقدان كارلا والمدين مع الموارد، برم الدفتج في مع فشات الدين - قرائل الوسان طريط معالها ، الخاص توان الافته الصرمة ، كان للذان الدين الدياق المواقي بوحاية

لتوجه ، " اين فؤلفة سنات وأمن بقية غاسم وملواق ومن أكال تعتقه تميش؟" والمال تعليل

الناك . إن الرئيس آمد رمونا.

39

رس، 201 تحکم تریز ۲ و اساء خطیا بستان عمادلوکو . و سعیر برکت اماد می وقع جنهان هر ب هر اندامه او منابع کنه ، اندین و خیاتی اندام می اسمین مع اجیزان. مقال اصحاح می خبر ختا ان اخذر ، خیاتی اندرین شریط، ساط، «ماعی توک (اعضه اخربیک کاره الملنان او با فوانه برماینه انصابی .

9

المداهركيين آسف وجرمه .

Object 1

50

اردیم آسماء من اغون الارانیه معیش میردادی رسان توت اورب مقلع ترزارده این معام اسید بالقرم من مدینا معنی

اللوم الاست المراجع وي الدين معاصل في المواجع من الموري اللوم الارام على موريون كان منون الرام ومعامن وعلى ويريونا العون الماني يعلق المناسل . وساعان بقد النسم والمستعمر ومعان الله العام الماني المحققين أعلان المواجع والمحالي في المطاور ومانعا مانية على

الطاهوزاسهموز تأكل المندب والنعذع والله تلبعي مصادية والمبادله تنقع

الفرود." إن فواقة ساد وأون بارة نظم وحارف رمن الل تمكه كمرو؟" وأسان عليل سبعث من موزان تمام ومان عن والعند بدق فياد وميله

الاولان ديندن من لولان مر ولان من ولان من مر من من مرب مد ويريه والولان ديندن من لولان وعمين يكترب للانج وموط مثل هرب مد العلوم ومامد كنت الوقاق البلاغ ويعلما ومراض عارك في البيت مواد موان

وقع الدياج في غالمان الغير خواج الموسط غريط مطاط. العظم تون الفة المورة كان الملك الديام الدغالة النظائد

39

ث فافقت لاجازه والجد وشيع المتاءع والماجه والمساحة

12

MILISE

إن الركيس آمي رمويه ،

المؤزومة بالسفاح ، وعنوع عنى وي الأزوج دب ما مدالغ بجربة مزام مؤدر

Style = "tight"

أراريا أصاده من اقوى الرائيد بعين مع يقور ربان في منان عن عرب مقلت لاريا. ربيه هن حاج احد بالقور، من عدينة مع تقورت بالقطع، ويرد عن عقومي وق وقوم عرفي عرب ماحد الذي يدرده طاور دكار حاد الفرديوم على مواطق في قو رفته معنان رمايه وكان التيس وقاي يقطف أخاصتان رسادن بنامع القعس

والمندوم يقوز لفة الجاء ط أطلاها فريا تحل طاني وخلل رك العطر ومانط متح

حود الظامر والمعوز تأكل العنب والددنع وفادة تلمع مصاغها والابتداء نغول

للعرفة " لي نواعة ساه وادن بلو، حاجم وطارق ومن اعز كمانة كون". الإلغان عليل يمدن حو ديون تطويرناي، مثان والواقت ودى تله.

وماء والراي دردت عن تولا وحسو يُحتي لذاني وقط معال في روحة الصباح وصابط كنترو البلاغ وفعالى عارك أن الردت فع الجنون .

المصابح مريك من منك الدين مواي المريني توريط معاماً. وقع الديام في **خص ع**ن منك الدين مواي المريني توريط معاماً. الطائق تتوات الفاة الهورة. كمان الملك الدرام **الصيني** الدفاني ₁₅ ما يك المناك الن الوكسين آمد وموتا .

39

الله مسر مستوقع رقاب فسیس موجع رود تقریب ان مک دو منشد تو میتر اس موج ای واقع مسر میتر است ویسر و بطای مقط می دیر است میتر است میتر است ویسر و بطای مقط می دیر این میتر این میتر است ویسر و بطای مقط می در این میتر این میتر اهمه مانشد و مدن این دارد این میتر این میتر این مانشد و میتر این میتر این میتر این میتر این مانشد و میتر این میتر این میتر این میتر این مانشد و میتر این میتر این میتر این میتر این مانشد و میتر این میتر این میتر این میتر این مانشد و میتر این میتر این میتر این میتر این مانشد و میتر این میتر این میتر این میتر این مانشد و میتر این میتر اینر اینر این میتر این میتر این میتر این

13

Writer indexes shown in green

Ranked by max $P(d|z_k) = argmax P(Image | Object_k)$

Object 2 Style = "loose"

ارت اسعادی اقدی الاداب بعیش به بلل دیا ب بی بستان

محر الاسمة بالتناح. ومَعْجَ قَرْي وَقِ الارمَة وَا الارمَة وَبِ عَامَدُ الَّذِي

الوت الزب شك تريا وفيد تمن وجابه أبحد بالترب ان حديقة

يدرجه دراج مندر القوية درمم على سربرجا في نزلديا د

وبيسعاد وساج يركبان إفري وشاكر يتطله المشعبق وببادة

يتعاد القصعاد والضندع يعتدك لغة العناد با أسادها شها خل

ماخيني وبقلا لاركب القطار وساخط أمغ بلرت الفاحر والجوز

"تأكل النب والجلج - وغامة المبني مصاغها ما يتبعًا شقول تغريت

» أين قراشة حناف وأين بترقة تاسم وغارى ... واكما كتك كوار؟

والسان عليل بجث عن وداد قام ولاي سان والهاتين برى أيها و

أوبياء والوادي رجمة خالؤ لأرا واستمريقتها فادنو رقبط جال

عرب نبد الصباع دخابط كتب البلوغ وفاخرشا. ف

الحت ج اليراد ، في الدجاج في كم امتات الخبر . فراش الموض

الشريط مطاط والبيناني كروت وللغة العربية وكالد وبالك النباغ

الدَّمَا في بسما يتد السكالتُ . بإن الرئيس أأسبت ومرئ

46

المتوافقه السمادطين إلايات بعيسانها باللاسة لايته

رتيت آرماد المرة المالير المساوجان العبر بالغربات جرب سمر

بالزوع المناج. و هوا مخرم ولما بتزرم و جامع إن مين قراع

الغرسروتكم فقط بالمشص ومادمو ليما التقعها والعنفاع فقول لغ

الفاد ما اجاما الأخل ماجه و المال رك القار رجاند مرتان

اللاحر والمعوز كالحل العتباريني ومادد تصب أحصا خلج وبيبعاد

كمكركوس فالمان أمايل بعيام ماليام شامونا ساجا سرم بالانا

متلول نغزي المسير خذات والياستير فاسمع والمهدد الجل

سمه نور روبه الوده سوية مدلولا وسيترق الدر، وتذهبونا حديد الم يصاع وعاملة كت إيلاع وغوهر سكركما البية

م بعبنام وتمد به مان الفي منا⁰ جنمن ماسم بطويع، سؤيد مفوط والعاصر خرات باللم ليماس فكديمك بديع لدندم بعاير

ارتب اسار فاقت الانائب جيتماع فبجل مياب ا

يتثان لوت مرب علقك مربا مربع علم المربع بالقرب فا عميقة سبر علامه المربع علم المربع الدمنة عب عامه المرب يدرية شام المندر القرية مربع علم

سريرحا فبالحذل زيار مسيدعنا حسابيا يركهانا التمس مناكل

يتعذ المستدس وحادث يأسره التعيس والفيقع يقول لغة

النباد حا الملحا تبويا ختل سامي معقد ركب القلار محاطي تربع طيرف الطاهر و الجوز تأكل العلب والنفع مريما وبالاس

حانيها ماليغار تغول شغير ، "أبن زائنا حقات سايت بعد بقرا الم معانت من أكل كمكة كوالر؟

ووسانا خليل يبعث غما بذانا الهام مثايه حنانا مانساتن بدی تین میں بین میں بوری عام دیا ہے۔ بیدی تین مربطہ والدامیہ بین میں اندازہ ، حسین کلمب تشاریہ مربطہ جالہ میں مذا الصباع میں بین کتب البیم مشیاض بنا تک تو الیمت م البیران ، ماع

الدجام أو مع نشات الغيز . تما مح المريض محريط

حاط الشاش تدات اللغة العربية . كان للك الاباع

الدان برمایی المکاری ، ون الرئیسی آست دمری . 48

. بیکان از روزه ارت در ده 48

متر لفن "م ع مريحة ترلداد سبق سلم بركيم

Classification by Spatial Pyramid Matching

Lazebnik, S., Schmid, C., & Ponce, J. (2006) Beyond Bag of Features: Spatial Pyramid Matching for Recognizing Natural Scene Categories, *Proceedings, CVPR*. Local feature correspondences Optimal *partial* match: match all of smaller set to some of larger set

Depicted are Feature Locations



m < n

Compare VQ indexes



 $\min_{\pi:X\to Y}\sum_{xi\in X} \|x_i-\pi(x_i)\|$

Slide credit: B. Leibe & K. Grauman, U. Texas, Ausin

Pyramid match Method

- Optimal matching too expensive
- Approximate optimal partial match



r = number of images

Pyramid match kernel: Histogram intersection



$$\mathcal{I}(H(\mathbf{X}), H(\mathbf{Y})) = \sum_{\mathbf{j}} \min\left(H(\mathbf{X})_j, H(\mathbf{Y})_j\right)$$
 Take minimum of each bin

Spatial Pyramid Matching: Processing Flow



Experimental Results

DUTCH

	Approach	Validation Paradigm	Features	Codebook Size	Rank-1 %Error	Time (hrs)
	pLSA	10-fold cross	Hessian- Laplace	512	11.8	15.4
MIIKC	Pyramid	SLOO	Hessian- Affine	512	10.4	4.01
Dutch Group	Bulacu & Schomaker (2007)	SLOO	Bulacu & Schomaker (2007)	400	16.0	?

250 Subjects 2 docs per subject 500 total documents Style: printed, uppercase Gray Scale Text Independent

Arabic

	Approach	Validation Paradigm	Features	Codebook size	Rank-1 %Error	Time (hrs)
MITRE	pLSA	SLOO	Hessian-Affine	512	1.30	5.1
	Pyramid	SLOO	Harris-Hessian-	2048	1.96	1.3
			Laplace			
	Pyramid	SLOO	Harris-Hessian-	2048	1.96	.16
	Read Codebook		Laplace			

51 Subjects 3 docs per subject 153 total documents Style: cursive Gray Scale Text Dependent

Strict Leave One Out (SLOO)



30

Summary

First known application of generative local computer vision models to forensics or biometrics

Beats best published results on Dutch

Learning is totally unsupervised

Works across different languages and text

Publications:

- Woodard, J. & Lancaster. M. Computer Vision Methods for Automated Writer Recognition (2011), to be presented at the *American Academy of Forensic Sciences*, 63rd Annual Scientific Meeting, February 21-26, 2011, Chicago, IL.
- Woodard, J., Lancaster, M., Kundu, A., Ruiz, D., & Ryan, J. (2010) Writer Recognition of Arabic Text by Generative Local Features, Proceedings, 4th *IEEE International Conference on Biometrics*, Washington, DC, September, 1-7.



Backups



32

References

- Gersho, A. & Gray, R. (1992) Vector Quantization and Signal Compression, Boston: Kluwer Academic Press.
- Hofmann, T. (2001) Unsupervised Learning by Probabilistic Latent Semantic Analysis, Machine Learning Journal, 42(1), 177:196.
- Lazebnik, S., Schmid, C., & Ponce, J. (2006) Beyond Bag of Features: Spatial Pyramid Matching for Recognizing Natural Scene Categories, *Proceedings, CVPR*.
- Sivic, J., Russell, B., Efros, A., Zisserman, A., & Freeman, W. (2005) Discovering object categories in image collections, *MIT AI Lab Memo AIM-2005-005*.
- Tuytelaars, T. & Mikolajczyk, K. (2007) Local Invariant Feature Detectors A Survey.
 Foundations and Trends, Computer Graphics and Vision, Vol. 3, No. 3, 177–280.
- Woodard, J. & Lancaster. M. Computer Vision Methods for Automated Writer Recognition (2011) accepted for presentation at the *American Academy of Forensic Sciences*, 63rd *Annual Scientific Meeting*, February 21-26, 2011, Chicago, IL.
- Woodard, J., Lancaster, M., Kundu, A., Ruiz, D., & Ryan, J. (2010) Writer Recognition of Arabic Text by Generative Local Features, Proceedings, 4th IEEE International Conference on Biometrics, Washington, DC, September, 1-7.





Lowe detector: Scale-Space



Low-Pass, Gaussian filtered versions of image

Bandpass filtered versions of image



© 2011 The MITRE Corporation. All rights reserved

35

Scale & Orientation Assignment

Use Gaussian & DoG representations



© 2011 The MITRE Corporation. All rights reserved

Scale & Orientation assignment



Orientation assignment

4 Rotate gradient magnitudes to dominant orientation after orientation is found



SIFT Descriptor

- 4 x 4 Gradient window. Compute for 16 windows
- Histogram each window in 8 directions
- 16 x 8 = 128 dimensional feature vector
- Represents stable, local image structure:
 - Strength of Gaussian filtered image gradient

Parameters determined experimentally

Quantized to 8 directions, or 45 degree slices



Some SIFT-Family detectors

SIFT Detector	Relative Strengths	Relative Weaknesses
Hessian-DOG (Lowe)	Invariant to rotation & scale. Good for blobs.	Corners, not fully affine invariant Occlusions & clutter may be an issue.
Hessian-Laplace	Very similar to Hessian-DOG but slightly higher location accuracy	Corners, not fully affine invariant Occlusions & clutter may be an issue
Maximally Stable	Affine invariant. Good for viewpoint change. Good with homogeneous regions with distinct boundaries. Good all-around.	Blur. Heterogeneous or complex-shaped regions.
Hessian-Affine	Blobs & ridges. Affine invariant. Good all- around across many sources of change. Good for occlusions & clutter.	
Harris-Affine	Blobs & ridges. Affine invariant. Good for occlusions & clutter.	
Harris-Laplace	Invariant to rotation & scale. Good for corners.	Not fully affine invariant, blobs
Harris-Hessian-Laplace	Corners. Good for occlusions & clutter.	