

דיגיטלי

עיבוד תמונות

ההרכב האטומי של מידע ויזואלי – גישות
חדשניות בעיבוד תמונות

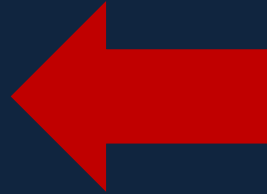
מיכאל אלעד
הפקולטה למדעי המחשב – הטכניון

הרצאה במסגרת הקורס
תגליות מדעיות (114010)
6 ביוני 2016

פרק 1

רקע ויסודות

נתחיל מהתחלה – שאלות יסוד



- ☐ איך תמונה עושה דרכה אל המחשב?
- ☐ משנכנסה אל המחשב, מה יוכל המחשב לעשות בה, שיצדיק את המאמץ?

עיבוד תמונות בטכניון

27 חברי-סגל
(מתוך 550 כלל
חברי הסגל בטכניון)
עוסקים בזירות
שונות של עיבוד
תמונות

הפקולטה למדעי המחשב



אלכס
ברונשטיין



מיכאל
צ'יבולבסקי



מיקי
אלעד



מיכה
לינדנבאום



אהוד
ריבלין



עירד
יבנה



רון
קימל



פרדי
ברוקשטיין

הפקולטה להנדסת חשמל



ענת
לירן



ליהי
צלניק-מנור



תומר
מיכאלי



גיא
גלבוע



יואב
שכנר



משה
פורת



דוד
מלאך



אריה
פויאר



יונינה
אלדר



רון
טלמון



ודים
אינדלמן
הנדסה
אירונאוטית



שגיא
פילין
הנדסה
אזרחית



ירח
דויטשר
הנדסה
אזרחית



מקסים
שושני
הנדסה
אזרחית



יעקב
רובינשטיין
הפקולטה
למתמטיקה



דב
דורי
הנדסת
תעשייה וניהול



דן
אדם
הנדסה
ביו-רפואית



חיים
אזהרי
הנדסה
ביו-רפואית



ענת
פישר
הנדסת
מכונות

פקולטות
אחרות

עיבוד תמונות באקדמיה בארץ ובעולם



עיבוד תמונות בתעשייה ובחיינו



בידור ביתי: נגן DVD, טלוויזיה דיגיטאלית, שידורי כבלים ולווין, מצלמות
תעשייה ביטחונית: לווינים, מזל"טים, מערכות תצפית, ראשי ביות לטילים
אבטחה אישית: מערכות אזעקה, ביקורת גבולות, מערכת עזר לנהג
רפואה: רנטגן, אולטרה-סאונד, CT, MRI, אנדוסקופיה, צילום גרעיני, מיקרוסקופיה
גרפיקה מתקדמת: ניהול וחיפוש במאגרי תמונות, עיבוד גרפי בפרסומות
תקשורת: פקסימיליה, שליחת תמונות, שיחות וידאו
ועוד: מיפוי כדור הארץ, מדפסות ומסכים, מערכות בדיקה לפסי מוצרים, טלסקופים חלליים, ...

חזרה לענייננו – עיבוד תמונות

אנו שאלנו:

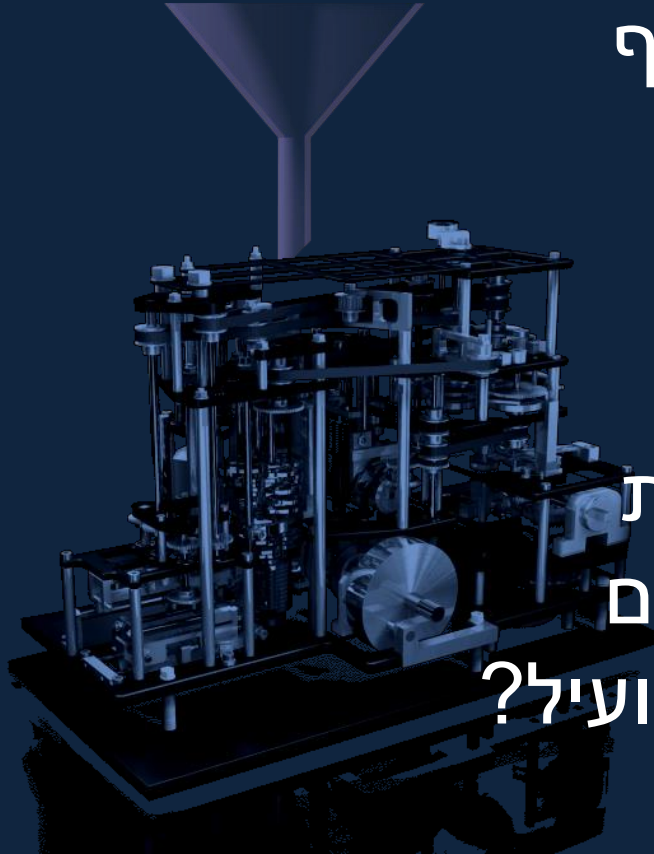
□ איך תמונה עושה דרכה אל המחשב?

← איך נהפוך תמונה לאוסף מספרים?

□ משנכנסה אל המחשב, מה יוכל להיעשות בה, שיצדיק המאמץ?

← איזה פעולות חשבונאיות נבצע על אוסף המספרים על מנת להפיק עיבוד מועיל?

88 88 1
45 7 19 8 66 51
70 44 62 32 99
33 3 67 91
100 12 23 86



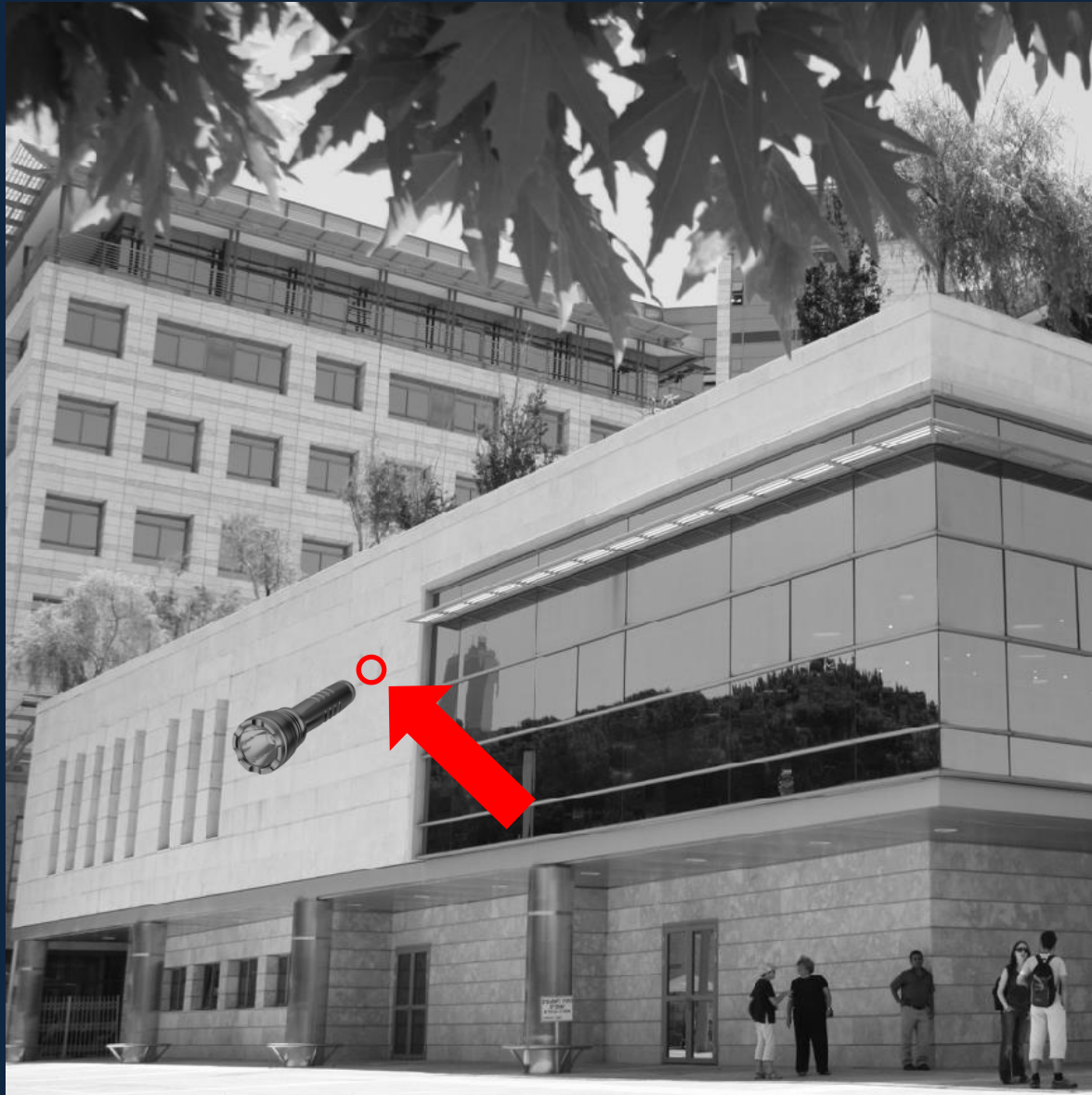
הפיכת תמונה לאוסף מספרים?



□ נניח שזו התמונה
שאותה נרצה להמיר
לאוסף מספרים.

□ כצעד ראשון, נמיר אותה
לתמונת שחור/לבן –
דבר שיקל על ההסבר.
כיצד הדבר נעשה ולמה
נבין בהמשך.

הפיכת תמונה לאוסף מספרים?

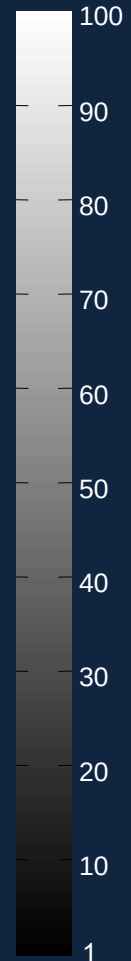


אוסף גווני האפור המעורבים
בבניית התמונה

הרבה
פוטונים
(100,000)



מעט
פוטונים
(1,000)



הפיכת תמונה לאוסף מספרים?

□ נניח שהיה עומד לרשותנו התקן אשר היה קולט את הפוטונים המגיעים ממיקום מסוים בתמונה וסופר אותם.

□ נניח שנספרו 60,000 פוטונים – לכן המספר שייחוס לנקודה זו הוא 60.



□ בעזרת התקנים כאלו נוכל להמיר כל נקודה בתמונה למספר, כפי שרצינו.

□ התקנים מסוג זה קיימים מזה מספר עשרות שנים:

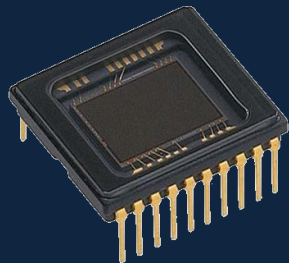
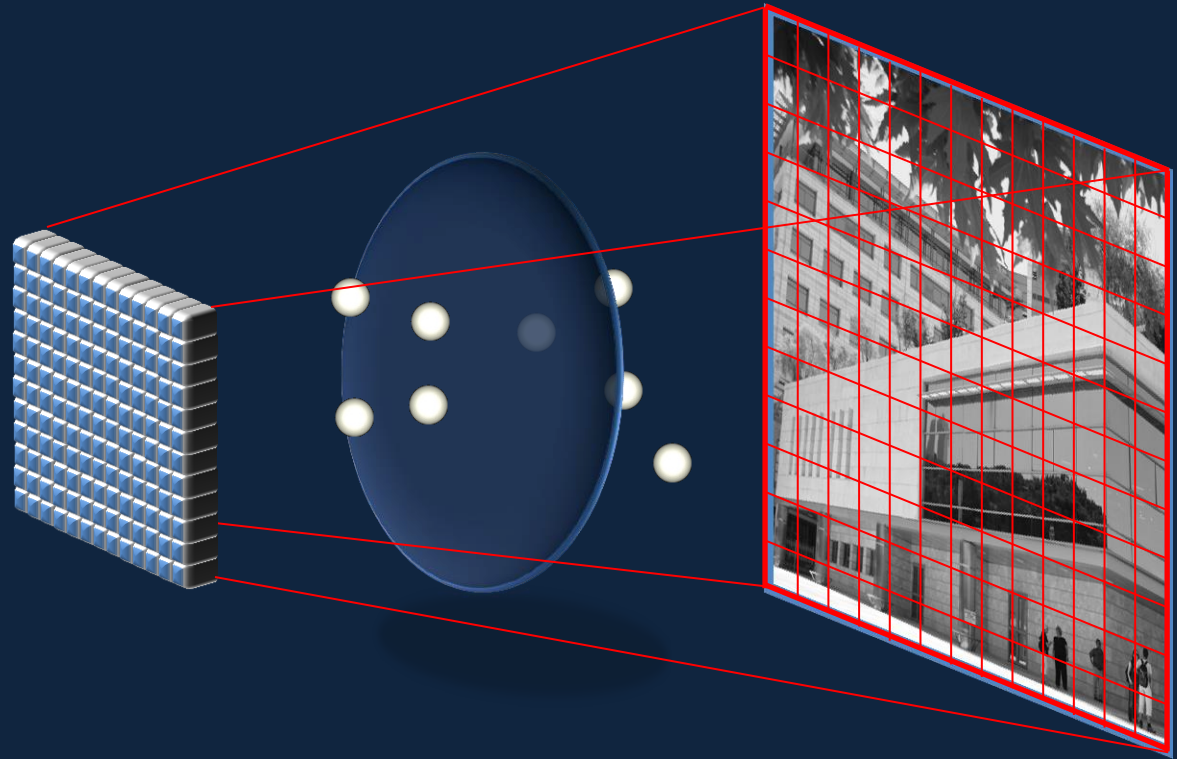
- טכנולוגית ה-**CCD** הומצאה ע"י Boyle & Smith ב-1969.
- לצד CCD קיימת גם טכנולוגיית **CMOS** שהומצאה ב-1981.

□ ממציאי ה- CCD קיבלו ב-2009 פרס נובל לפיזיקה על תגליתם.

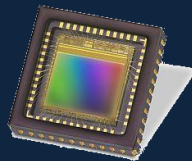


הפיכת תמונה לאוסף מספרים?

□ נניח אם כן כי
ברשותנו מערך של
גלאים הסופרים
את הפוטונים
הפוגעים בהם
וממירים כמות זו
למספר בתחום
[1,100] בכל גלאי



CCD Chip אופייני
הכולל 1300 על 1600
גלאים כמערך של
שורות על עמודות



התקן CMOS אופייני
בגודל של 6 על 8 מ"מ,
ועם מערך של כ- 2000
על 3000 גלאים

□ כל גלאי יתמקד בנתח קטנטן של התמונה
ויספור את הפוטונים הנובעים ממנו.
□ הדרך לוודא שכל גלאי "רואה" רק את הפוטונים
המתאימים לו היא עדשה שתוצב נכון בין
התמונה ובין מערך הגלאים.

הפיכת תמונה לאוסף מספרים?



□ ובפועל ...

התמונה נחלקת לתאים
קטנים – אחד כנגד כל
גלאי – ותא זה מומר
למספר יחיד בתחום בין
1 ל-100.

□ כל תא כזה קרוי פיקסל:
Pixel = Picture Element.

□ בדוגמה המוצגת כאן
החלוקה תניב 50 על 50
(כלומר 2500) פיקסלים.

הפיכת תמונה לאוסף מספרים?

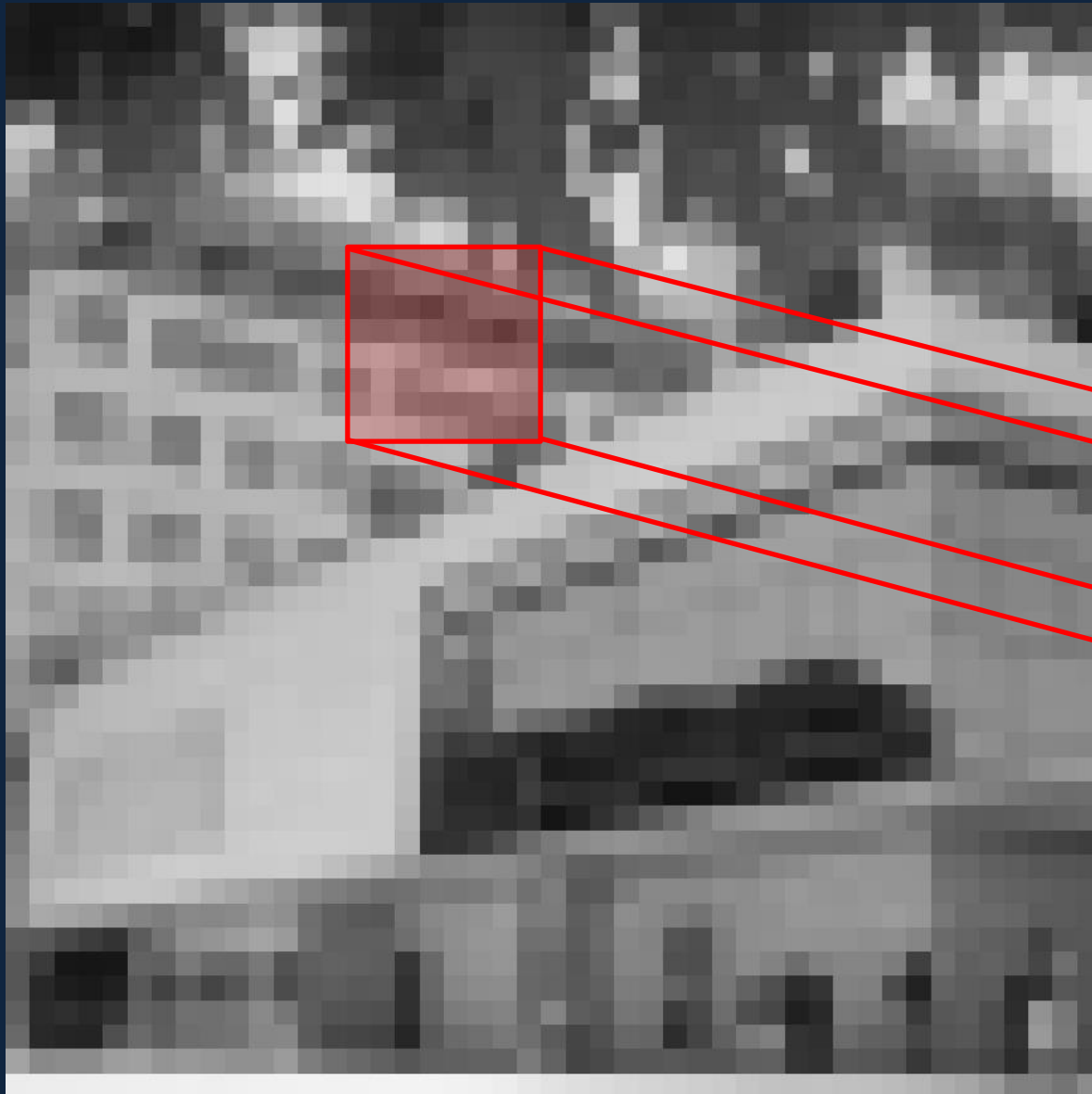
□ זהו אוסף המספרים שייצג את התמונה.

□ רואים כי אזורים בהירים
הינם בעלי ערך גבוה
הקרוב ל-100 ואזורים
כהים קרובים ל-1.

□ המחשב מקבל
את המספרים
ולא יותר!

11080809	122010	172739	344840	192015	1512821	121018	133230	171516	162116	172021	232023	202322	2332121	2421
1008	1011	1009	1117	2053	7172	6439	2317	1417	2123	2322	2118	2755	1718	1718
1008	1119	1213	1525	1937	7576	5024	1815	1414	2425	2524	2327	4850	2320	2027
3120	2553	2632	4472	3228	5572	4754	49							
1211	1221	1502	2328	2961	4357	3720	1818	2025	2225	2624	2460	6821	2022	22
2623	3522	2969	7661	3172	7670	7663	3442	2023	2126	2330	5779	5522	2322	23
2424	2423	3969	6163	5573	6773	7673	7168	2729	2525	2731	5035	4271	3542	59
4222	2222	2027	2727	2656	2424	5224	2524	2534	4426	2526	3345	5056	6359	62
7573	6349	3447	2526	3030	5140	5358	6678	4331	2528	2924	2628	2455	2940	53
2528	2531	6928	2625	3640	4045	5450	6375	7357	4139	3831	3333	3945	5861	74
7980	7973	3231	3029	2928	2858	5678	4926	2828	2628	3941	2728	2838	3536	47
4642	6364	4743	4360	4337	3642	4346	5355	6370	7865	5159	5131	3228	3030	67
7949	2743	3127	3327	3027	3229	3429	2629	3329	4048	3742	3935	2126	3537	41
4047	4245	5052	5866	7469	4049	2832	3046	7853	5952	4529	2931	3233	3739	36
2625	2928	2636	3539	2829	3138	3423	2733	3939	4846	4349	4551	5539	6232	34
3134	6363	7965	6452	2930	3229	4763	5031	3029	3628	2529	3759	6261	5646	44
4032	3930	2929	3237	4647	4142	5037	4542	3348	7067	6764	4031	3024	2039	66
6342	4537	3932	2526	4960	5343	4865	6463	5750	4438	3943	3033	3026	3443	43
4343	5254	3545	5562	6360	4539	2821	2134	7069	6558	4136	3722	1449	6151	42
4366	4445	5063	6364	5751	4241	4338	3633	2633	3837	4442	4143	4857	3837	30
3055	6970	7066	6564	6351	3310	4562	6257	5264	4445	4042	4249	6356	6265	60
6265	6053	4541	4144	3208	3738	3842	6048	5665	7070	7171	7165	6666	6664	64
5861	6465	6564	6460	5460	5945	4861	4954	6166	5953	4340	3137	3934	4466	67
7171	7271	7167	5861	6163	6463	6360	5962	4345	5564	6366	6666	6665	6454	53
5359	4643	4444	5046	5766	6053	5159	6971	7172	7272	7271	7163	5147	3840	45
5460	6259	5661	4646	5459	4342	6556	5865	6767	6665	6356	5244	4237	4265	48
6670	7071	7172	7272	6856	4749	5859	4644	4239	3841	4660	6359	5457	4544	60
6359	5457	5745	4466	4946	5754	4957	6265	6667	5234	3847	6870	7172	7272	70
6351	5055	5953	3929	2223	2934	4042	6364	6564	6461	6663	4860	5348	5140	46
5357	3532	5969	6971	7273	6956	5053	6156	4529	3445	4554	4643	3326	2029	23
2929	2928	2858	5678	4926	2828	2628	3941	2728	2838	3536	4746	4747	4232	47
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232
4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232	4232

הפיכת תמונה לאוסף מספרים?



□ וכך התמונה תיראה בפועל, כשנצבע כל פיקסל בגוון שמיוחס לו.

□ ניכר כי איבדנו מידע רב וגם ברור מדוע.

□ הפתרון: חלוקה ליותר פיקסלים אשר יהיו קטנים יותר.

הפיכת תמונה לאוסף מספרים?



חלוקה ל- 100 על 100
פיקסלים

הפיכת תמונה לאוסף מספרים?



חלוקה ל- 200 על 200
פיקסלים

הפיכת תמונה לאוסף מספרים?



חלוקה ל- 300 על 300
פיקסלים

הפיכת תמונה לאוסף מספרים?

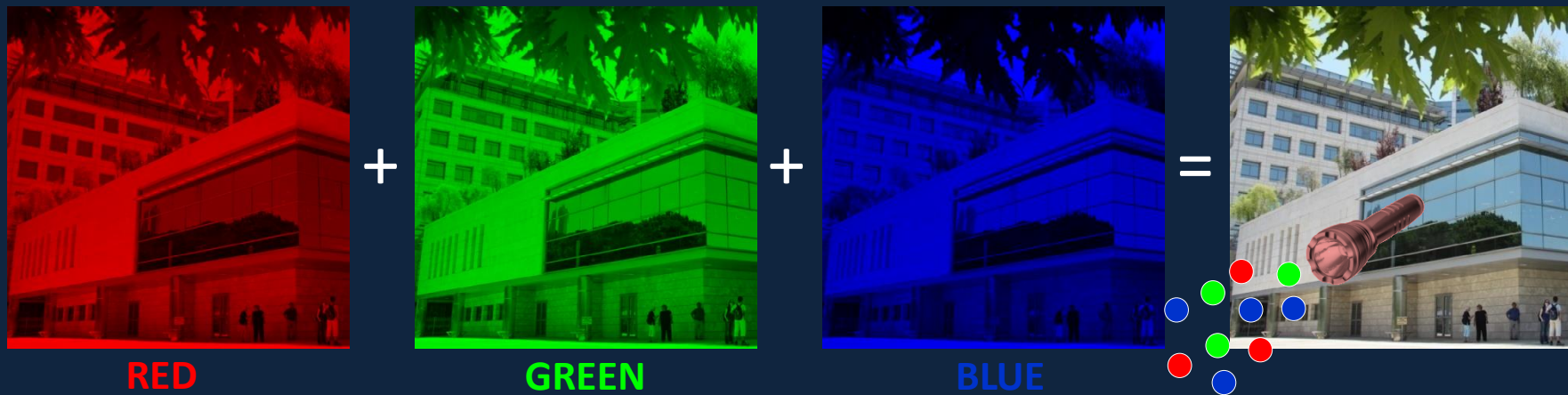


חלוקה ל- 500 על 500
פיקסלים

A black and white photograph of a modern, multi-story building, likely the University of Turin. The building features a prominent glass facade on the right side, reflecting the surrounding environment. The upper floors have a stone or concrete facade with numerous windows. In the foreground, several people are walking on a paved area. The image is framed by large, dark leaves in the top left corner.

- 19

ומה באשר לצבע?



□ תמונה צבעונית אינה אלא שלוש תמונות שחור־לבן, כשכל אחת "מאירה" בגוון שונה (אדום, ירוק, או כחול), ומיזוגן יוצר את אשליית הצבע העשיר שאנו רואים בתמונת התוצאה.

□ כיוון שכל אחת משכבות הצבע מאפשרת 100 רמות-אפור, סך כל הצבעים האפשריים בתמונה הצבעונית הוא $100 \times 100 \times 100$ (מיליון) בשילוב השלושה.

□ גישה זו לבניית הצבע היא אחת מכמה אפשרויות, ויתרונה בפשטות התיאור שלה.

□ חשוב להבהיר: תמונות ה-R, G, ו-B למעלה שונות זו מזו, וההבדל ביניהן הוא לא רק בגוון הכללי.

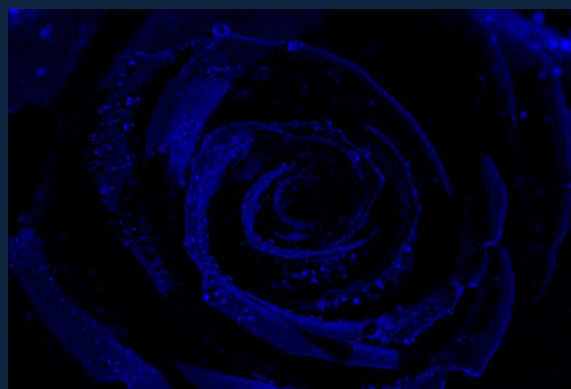
צבע בתמונה – דוגמא אחרת



ערך ממוצע
(מתוך 100)
הוא 77



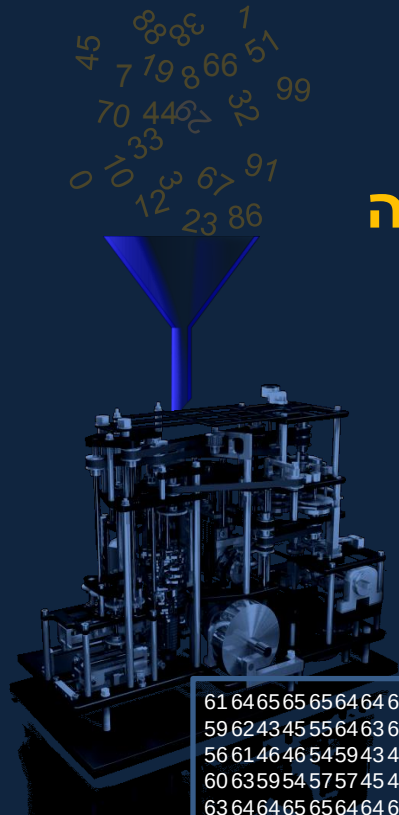
ערך ממוצע
(מתוך 100)
הוא 8



ערך ממוצע
(מתוך 100)
הוא 10

טיפול בתמונה ע"י המחשב?

- ❑ כעת אנו חוזרים לשאלה – מה נעשה עם המספרים המייצגים את התמונה באופן שיוביל לעיבוד מועיל?
- ❑ במקום תשובה שיטתית, אנו נקפוץ **הישר לעובי הקורה** ונציג מגוון של בעיות בתמונות ופתרון בעזרת מחשב.
- ❑ משותף לכל הבעיות שיוצגו:
 - לא נספק הסבר על כיצד, אלא נציג הבעיה ופתרונה.
 - הפתרונות לקוחים ממגוון מקורות.
 - לכל בעיה יש ריבוי פתרונות אפשריים ואנו נציג אחד מהם.
 - בכל המקרים מדובר בפעולות חשבוניות על התמונה:



61 64 65 65 65 64 64 60 54 49 46 50 59 45 48 61 49
59 62 43 45 55 64 63 66 66 66 66 65 64 54 53 59 46
56 61 46 46 54 59 43 42 65 56 58 65 67 67 66 65 63
60 63 59 54 57 57 45 44 66 49 46 57 54 49 57 62 65
63 64 64 65 65 64 64 61 66 53 48 60 53 48 51 40 46
61 55 44 48 64 61 63 64 64 65 65 65 64 60 47 32 37
61 55 46 44 65 51 43 47 63 55 58 64 65 66 55 42 44
63 59 53 48 64 50 48 52 62 48 50 61 46 45 62 67 69
59 61 63 65 66 66 61 61 61 55 46 55 59 67 69 70 70
60 52 56 53 55 58 49 55 53 59 62 66 67 68 69 70 70
61 57 55 49 52 50 48 51 61 66 68 69 69 69 69 70 67
55 43 42 46 50 54 63 66 67 68 69 70 69 69 70 70 69
51 40 33 49 61 66 67 68 69 68 68 69 69 69 69 70 69
51 51 57 65 66 67 67 68 67 68 70 70 69 70 70 72 69
47 58 64 65 66 67 66 63 63 69 70 71 70 71 71 72 68
36 61 65 64 62 63 62 61 61 70 70 71 71 71 72 72 67



72 68 32 31 33 46 38 35 28 20 14 13 11 14
72 67 28 21 23 19 15 12 16 14 14 13 13 15
72 66 22 16 14 14 21 10 11 11 14 17 19 19
72 65 20 15 15 13 23 17 16 17 18 11 08 08
72 64 20 17 17 15 17 08 12 18 25 33 40 47
72 62 17 19 23 31 40 46 50 52 52 50 48 46
59 53 49 50 50 50 45 41 33 33 37 38 38 41
39 39 42 42 43 47 40 44 31 32 44 49 49 48
31 41 49 51 52 55 43 44 34 37 51 48 44 41
34 39 47 51 53 53 39 40 33 38 48 47 30 28
33 19 39 50 52 53 36 36 31 36 47 47 28 28
32 17 38 47 49 50 36 36 32 35 44 43 35 31
28 17 36 44 45 47 37 47 33 32 42 41 21 26

פרק 2
משימות קלאסיות
בעיבוד תמונה
ופתרון

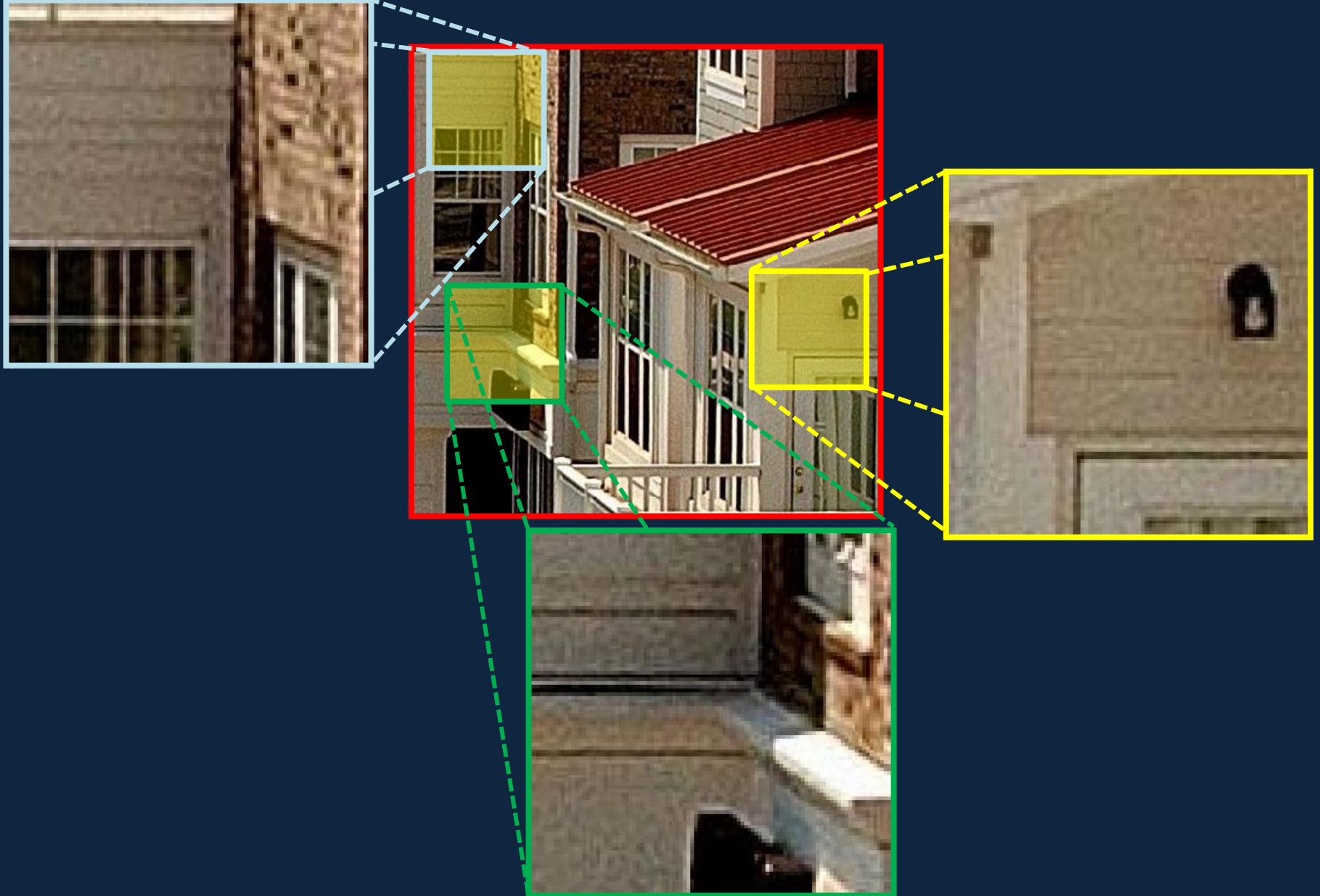
בעיה 1: ניקוי הפרעות (רעש)



תמונה זו בגודל
1200 שורות על
2000 עמודות
והיא הוקטנה כדי
להתאים למסך

נתח זה מהתמונה הוא בגודל
400 שורות על 400 עמודות והוא
מוצג בגודלו המקורי – כעת ניתן
לראות תופעה של רחש מטריד

בעיה 1: ניקוי הפרעות (רעש)



בעיה 1: ניקוי הפרעות (רעש)



תוצאת ניקוי הרעש ע"י שיטה הקרויה bilateral-filtering אשר
פותחה ע"י Tomasi and Manduchi בסטנפורד ב- 1997.
שיטה זו נשענת על שיטה אחרת הקרויה Beltrami-Flow
שפותחה בברקלי ב- 1996 ע"י Sochen , Kimmel, and Malladi

בעיה 1: ניקוי הפרעות (רעש)



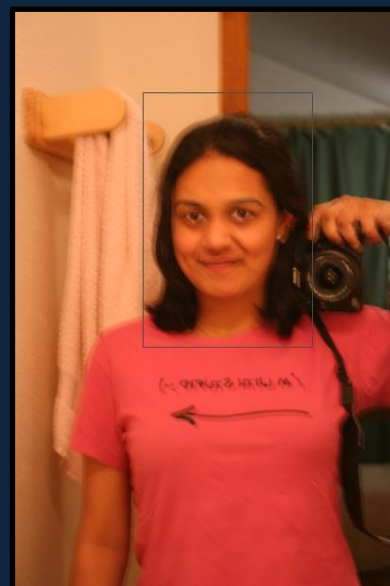
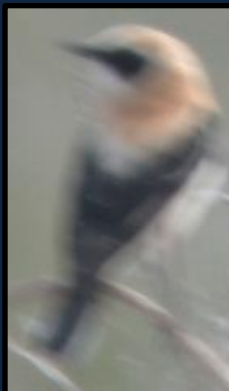
תוצאת ניקוי הרעש ע"י
ה- bilateral-filtering

בעיה 2: שחזור מטשטוש



תוצאות אלו נשענות על עבודתם של
Dabov, Foi, Katkovnik, and Egiazarian
(2007) מאוניברסיטת טמפרה, פינלנד

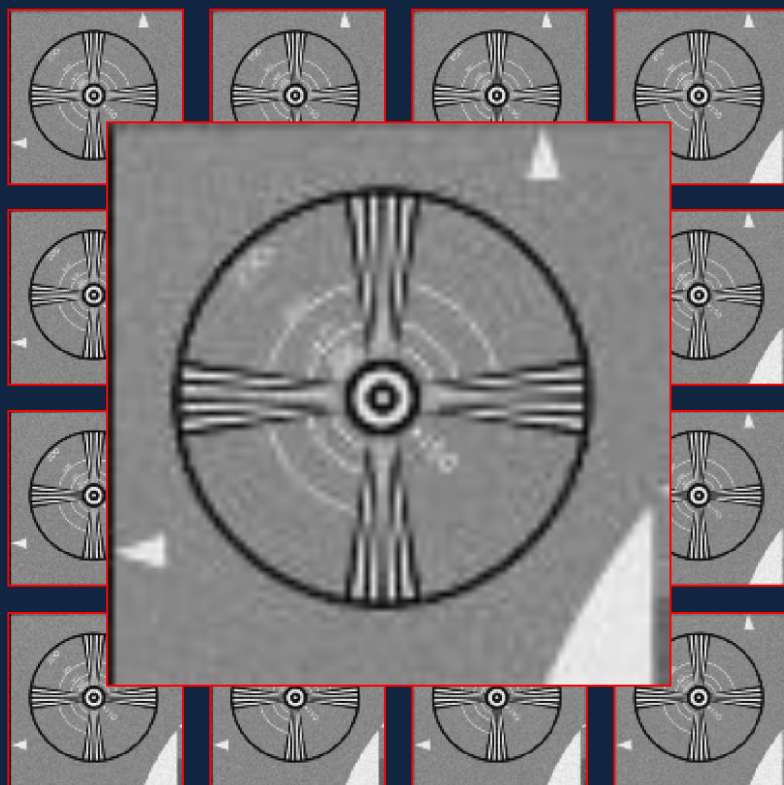
בעיה 2: שחזור מטשטוש



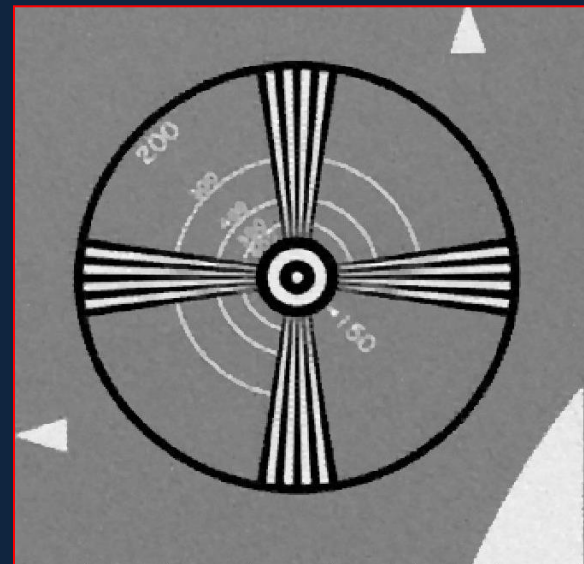
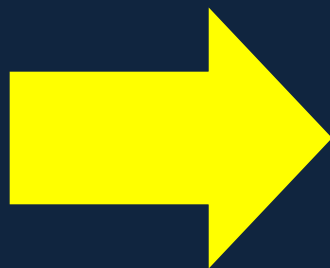
תוצאות אלו נשענות על
עבודתם של Fergus,
Singh, Hertzmann,
Roweis, and Freeman
מאוניברסיטת MIT,
ארה"ב (2006)

בעיה 3: סופר-רזולוציה

נתון סט של תמונות ירודות באיכותן



רצוננו למזג את המידע
בתמונות הנתונות ולהפיק
תמונה אחת באיכות טובה יותר



בעיה 3: סופר-רזולוציה



תוצאות אלו נשענות על עבודתם
של Farsiu, Milanfar, and Elad
מאוניברסיטת UCSC וסטנפורד (2003)

בעיה 4: שיפור איכות (אובר)

תוצאות אלו נשענות על עבודתם של
Schechner, Karpel, and Treibitz
מהטכניון (2005)



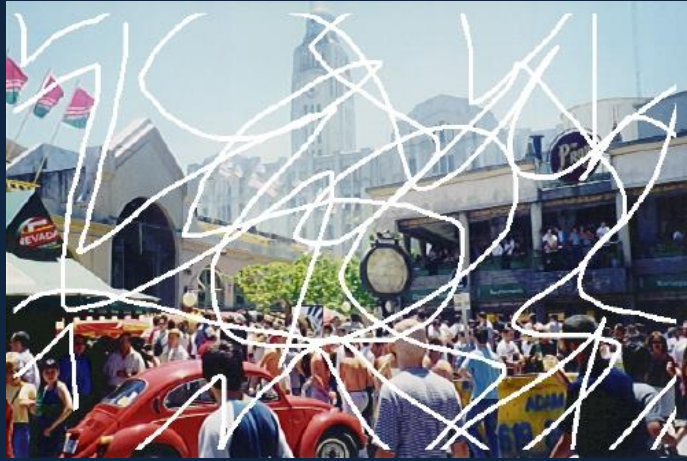
בעיה 5: תיקון תאורה



תוצאות אלו נשענות על
עבודתם של
Kimmel, Elad, Shaked,
Keshet and Sobel
(2002)



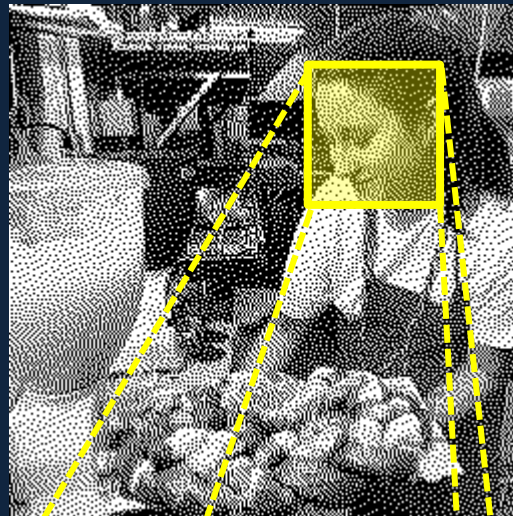
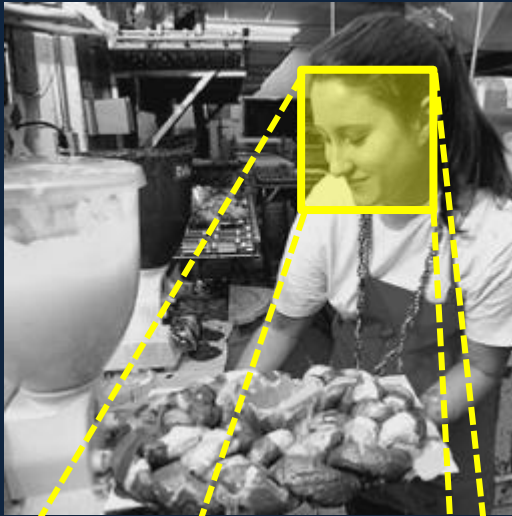
בעיה 6: מילוי חורים בתמונה



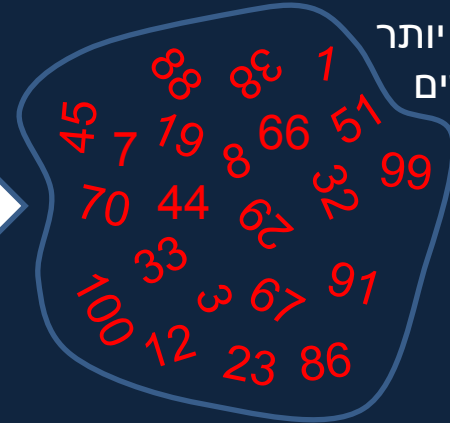
תוצאות אלו נשענות
על עבודתם של
Bertalmio, Sapiro,
Caselles, and
Ballester
מאוניברסיטת דיוק
(2000)



בעיה 7: הדפסה בסט צבעים מוגבל



בעיה 8: דחיסת תמונות

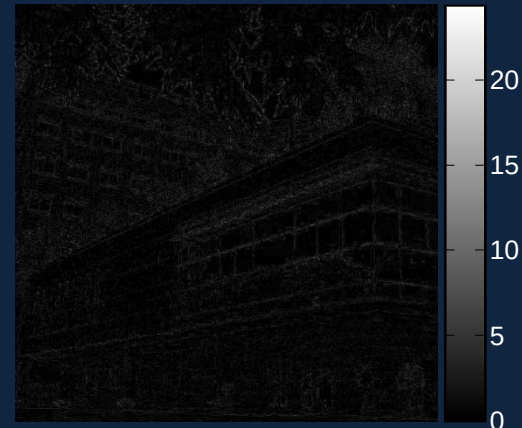


כמות קטנה יותר
של מספרים

תמונה זו צורכת זיכרון של
3,000,000 מספרים (גודלה
הוא 1000 על 1000 פיקסלים)

פורס
תמונה

זוהי תוצאה אמיתית
שהתקבלה בשיטה
הקרויה JPEG עם
60,000 מספרים
בלבד (דחיסה פי 50)

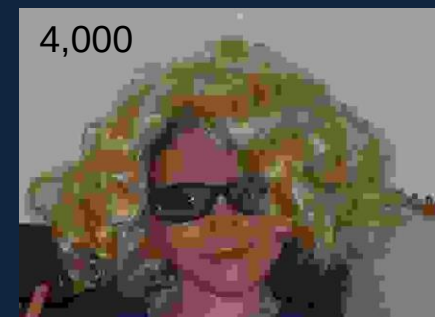


בעיה 8: דחיסת תמונות



70	70	71	70	66	55	51	53	61
71	69	60	50	50	57	56	43	30
55	49	53	57	47	34	34	44	55
58	52	38	33	44	54	53	52	55
34	41	52	54	55	55	53	50	53
51	41	54	52	53	52	54	54	56
39	36	51	53	55	54	55	54	56
40	34	54	54	55	54	52	43	30

- ❑ עיקרון הפעולה של דוחס: גילוי ה-"שומנים" (מידע מיותר) בתמונה וסילוקם.
- ❑ מידע מיותר מתבטא בכך שפיקסלים סמוכים צפויים להיות קרובים בערכם – ככלל, מקור מידע בו ניתן לנבא ערך של דגימה אחת מאחרות בצורה טובה הינו מידע דחיס.
- ❑ בתהליך הדחיסה של תמונה ב-JPEG אנו יכולים להקריב את איכות תמונת התוצאה לטובת דחיסה עמוקה יותר.



וקיימות בעיות רבות אחרות ...

- ☐ סילוק הפרעות מבניות בתמונות
- ☐ הפרדת תמונות (בהשתקפויות)
- ☐ התאמת תמונות זו לזו
- ☐ בניית פסיפסי תמונות
- ☐ מציאת אובייקטים בתמונות
- ☐ עיוותים גיאומטריים לתמונות
- ☐ עריכת תמונות – הוספה והורדה של עצמים
- ☐ תיקוני צבע בתמונה
- ☐ טיפול בוידיאו (סדרות של תמונות) – ניקוי מרעש, שחזור, מילוי חורים, דחיסה, עקיבה, ...
- ☐ טיפול בהדמאות רפואיות – MRI, אולטאסאונד, CT
- ☐ טיפול בהדמאות מכ"ם (SAR)
- ☐ ...

פרק 3

המחקר שלנו

מי אנחנו ?



סטודנטים
למאסטר
ודוקטורט



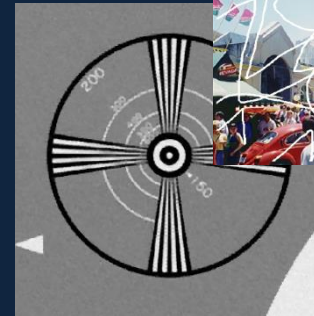
שיתופי
פעולה
בטכניון



שיתופי
פעולה
בעולם

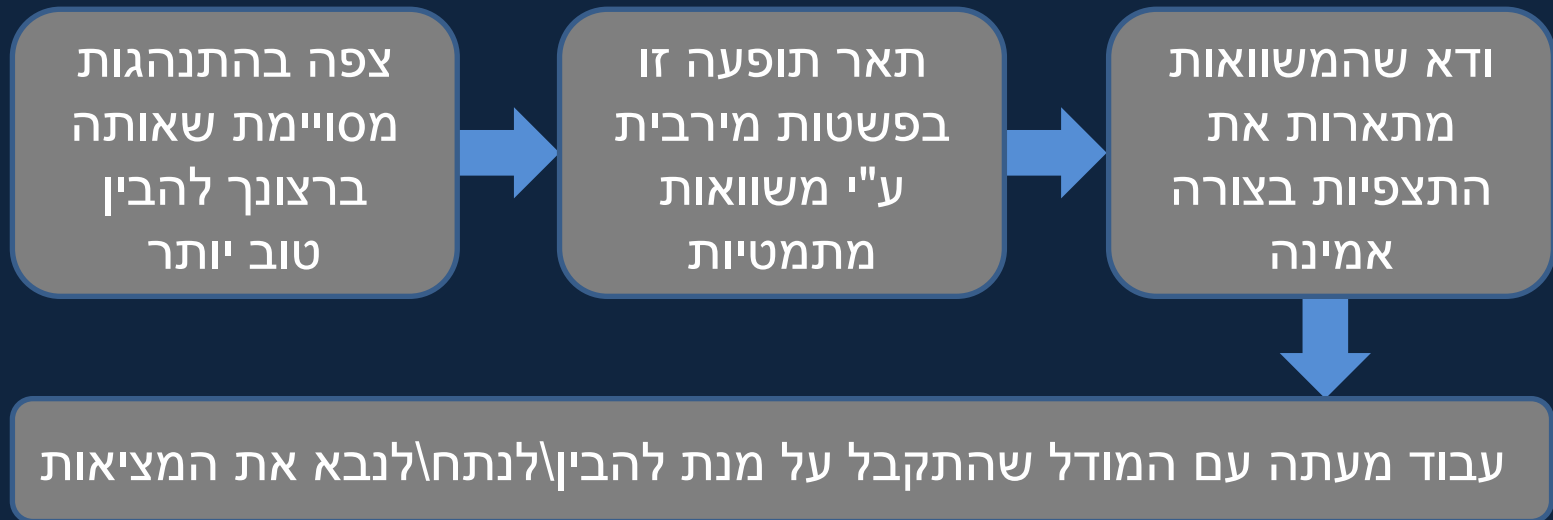
המודל וחשיבותו

- פגשנו מגוון בעיות ופתרון: ניקוי רעש, שחזור מטשטוש, טומוגרפיה חישובית, סופר-רזולוציה, תיקוני תאורה, מילוי חורים, דחיסה.
- בכל אלו ובבעיות רבות אחרות בעיבוד תמונות, ה-"כוכב" המרכזי הוא **מודל לתמונה**, אשר בזכותו מושגות התוצאות.



המודל וחשיבותו

□ שימוש במודל לתיאור המציאות לא אמור להיות זר לנו, והוא עובר כחוט השני במגוון תחומים מדעיים כגון פיזיקה, כימיה, ביולוגיה, רפואה, חקר המוח, כלכלה, ועוד. הרעיון הבסיסי:

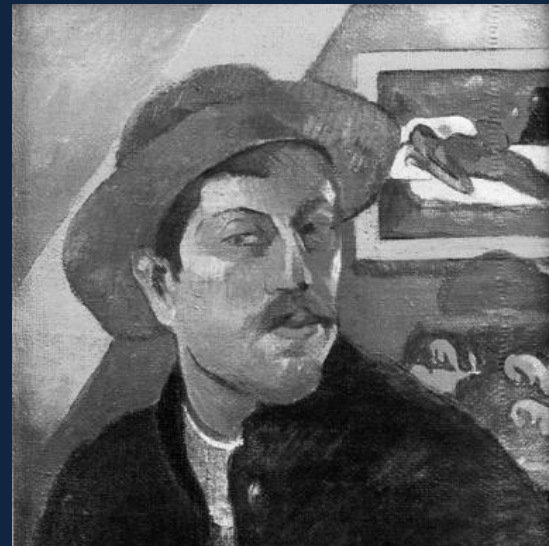
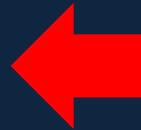
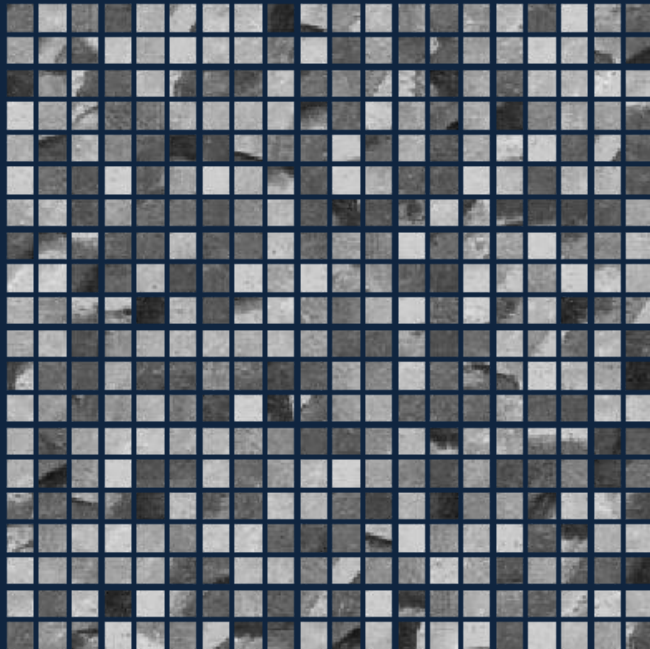


□ חישבו על כך – כל הפיזיקה בנויה בצורה זו. לשם דוגמה, אלוהים מעולם לא כתב את המשוואה $f=ma$ הקושרת בין מאסה, תאוצה וכוח. אנו, המדענים ניסחנו זאת בנסותנו למדל את המציאות.

אז מה זה מודל בתמונות?

נסביר זאת דרך הדוגמה הבאה (עבור תמונות שחור-לבן):

- נניח כי ברצוננו להציע מודל לפיסות של תמונה בגודל של 10×10 פיקסלים.
- נתבונן בהרבה פיסות כאלה (לקוחות מתמונה מסוימת), ונציע **תכונה מתמטית** שפיסות אלו נוטות לקיים.
- דוגמה למודל פשוט (ופגום!!): **נניח כי** המודל קובע שכל פיסה של 10×10 פיקסלים צפויה להיות בעלת **פיקסלים זהים**. פירוש הדבר שכל 100 פיקסלים ניתנים לתיאור ע"י מספר יחיד (הורדת מימד).
- משמעות המודל: כל חריגה מתכונה זו תיוחס לשגיאה בנתונים ולא למידע אמיתי.



איך נשתמש במודל?



דוגמה – ניקוי רעש בתמונה בעזרת מודל זה:

- ☐ הוצא כל פיסה מהתמונה.
- ☐ הטלה למודל: מצא את הפיסה הקרובה אליה ביותר שמקיימת את הנחת המודל.
- ☐ הנח את הפיסה החלופית בחזרה למקומה.
- ☐ חזור על תהליך זה לכל פיסה.
- ☐ אם ישנן חפיפות, מצע ביניהן.

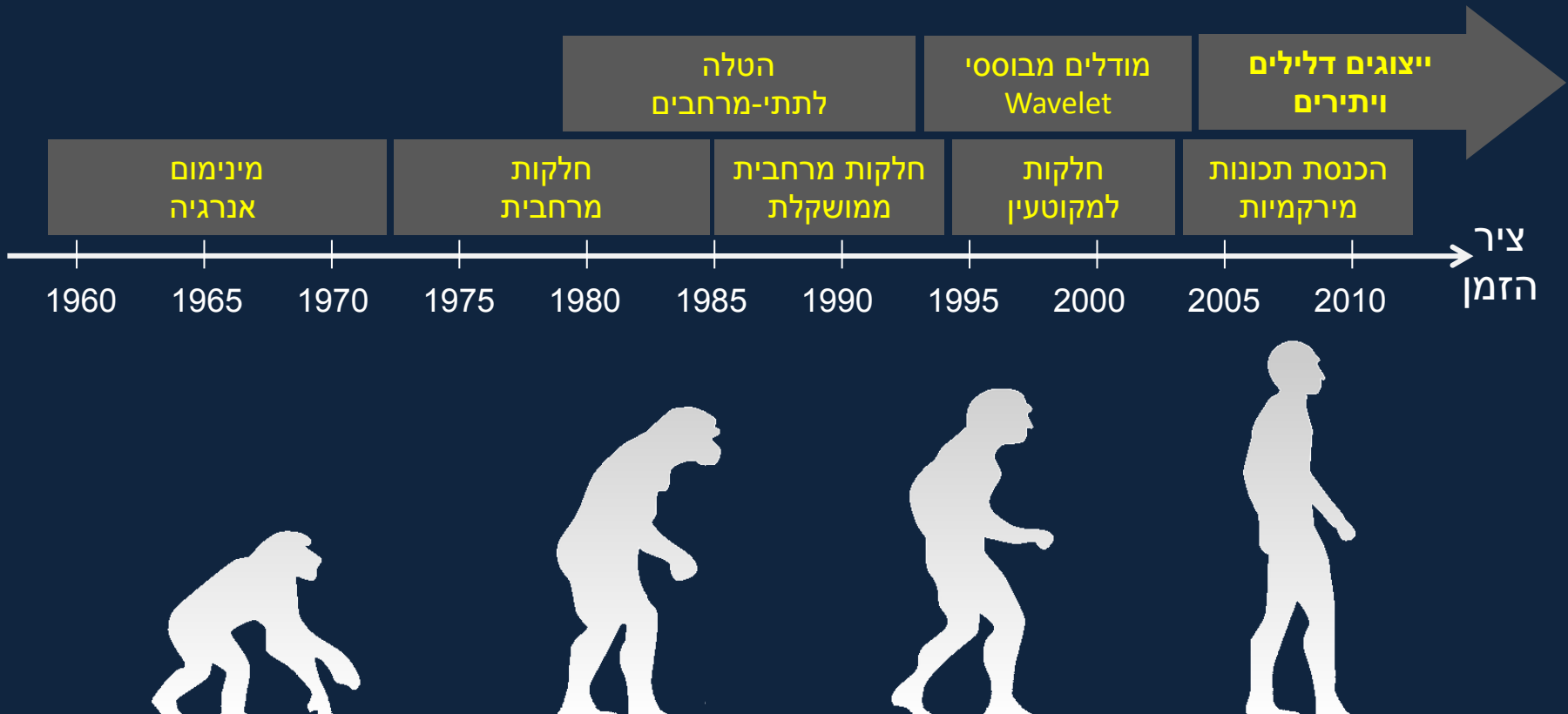


תוצאת
התהליך

תוצאה לא מלבבת – בשל
הישענות על מודל לא מוצלח

אבולוציה של מודלים בעיבוד תמונות

המחקר בעיבוד תמונות הינו בעיקרו אבולוציה של מודלים, ובניית פתרונות לבעיות בהתבסס עליהם



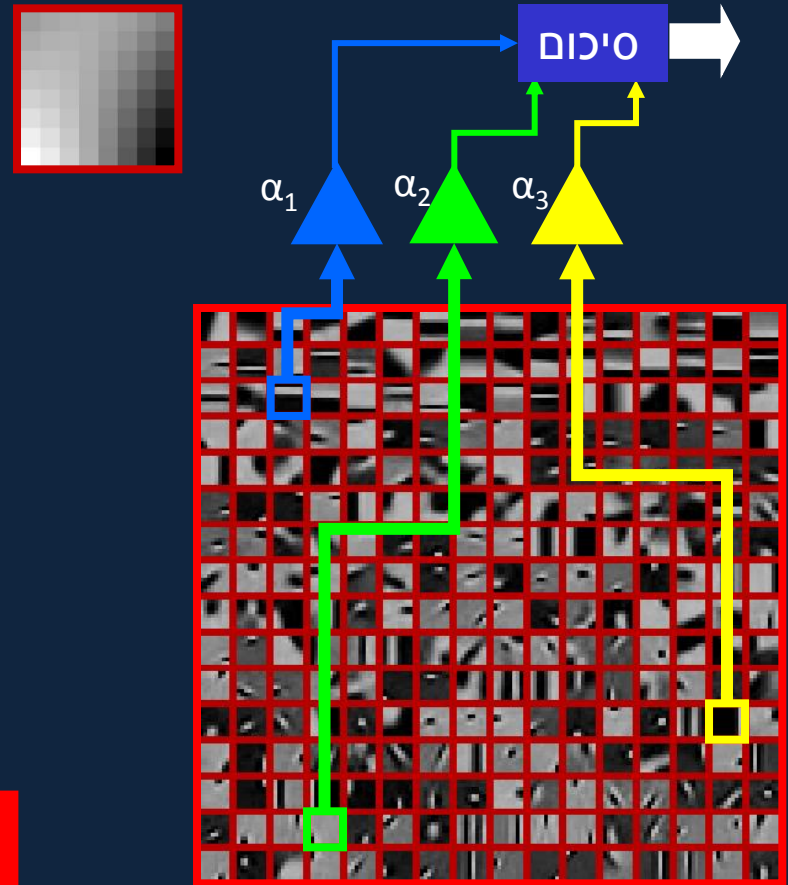
ה-"כימיה" של התמונות – מודל חדש

□ נניח שוב כי ברצוננו להציע מודל לפיסות של תמונה בגודל של 10×10 פיקסלים.
□ נציע את **התכונה מתמטית** הבאה שאותה "נכפה" על פיסות אלו:

- אנו מניחים קיומו של **מילון** ובו פיסות-יסוד (**אטומים**) בגודל 10×10 פיקסלים שאיתם נבנה את פיסות התמונה.
- במילון שלנו 256 אטומים.

▪ הנחת המודל: כל טלאי שיבוא מהתמונה ניתן יהיה להרכבה כממוצע משוקלל של **מקבץ קטן** של אטומים.

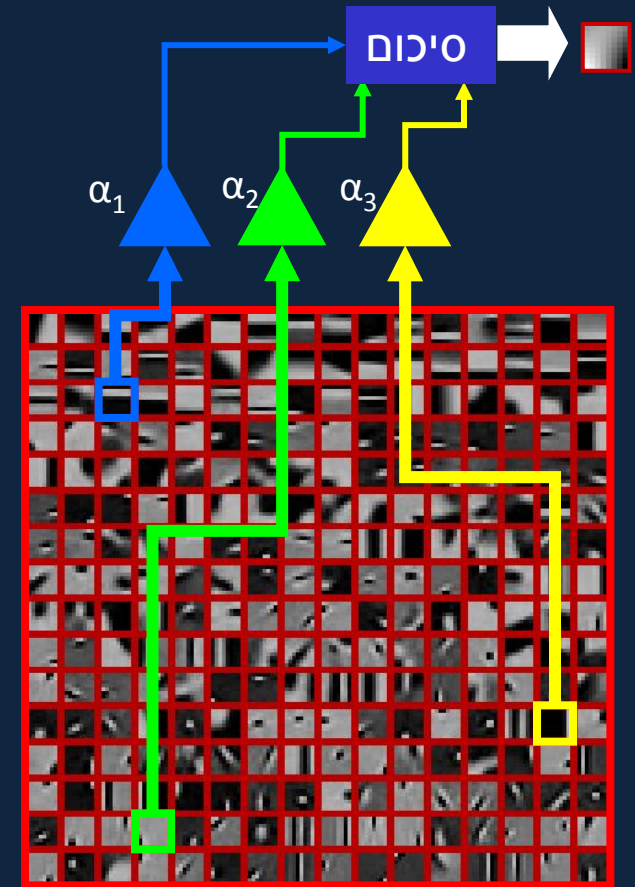
הסתכלות אחרת: המילון מהווה את הטבלה המחזורית בכימיה של הפיסות שלנו. אנו מתייחסים לכל פיסה בתמונה כמולקולה המורכבת ממיעוט של אטומים במינוחים שונים.



ייצוגים דלילים ויתירים

מושגים מרכזיים במודל זה:

- אנו מתחילים בפיסה בגודל 10×10 פיקסלים, כלומר 100 מספרים.
- אנו ממירים פיסה זו בייצוג חלופי ובו 256 מספרים המתארים לכל אטום את מינונו בתערובת שתבנה את הפיסה הנתונה – זוהי היתירות (ניפוח האינפורמציה).
- אבל ... מתוך אותם 256 מספרים מיעוט קטן שונה מאפס (נניח 8 איברים שונים מאפס) – זוהי הדלילות.
- המשמעות: מ-100 מספרים ירדנו לתיאור שמסתפק ב-16 מספרים – זהות האטומים המעורבים ומינונם.
- כמקודם, וכמו בכל מודל, גם כאן מושג כיווץ בתיאור המידע וזה חשוב להצלחתו.



בעיה #1 במודל ופתרונה

ניתן לתאר בעיית פירוק זו בניסוח אלגברי (וקטורי-מטריצי) כמערכת משוואות ליניארית מהצורה:

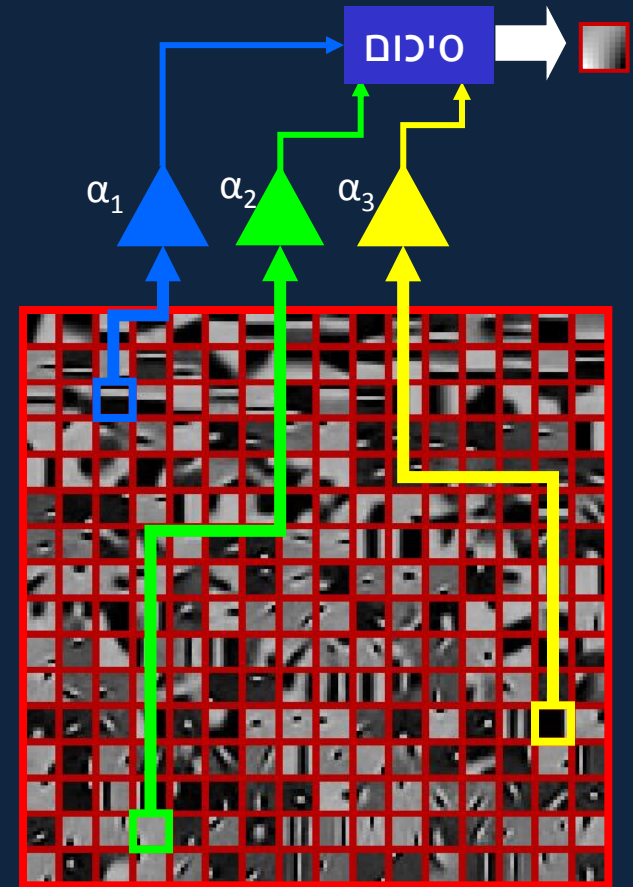


The diagram illustrates the linear system $D\alpha = X$. On the left, a red grid representing matrix D has dimensions $m > n$ (width) and n (height). To its right is a vertical vector α of length n , with a few yellow squares indicating non-zero elements. An equals sign follows, leading to another vertical vector X of length n , which is entirely red.

ייחודה של מערכת זו בכך שיש בה יותר נעלמים ממשוואות ולכן יש לה באופן כללי אינסוף פתרונות.

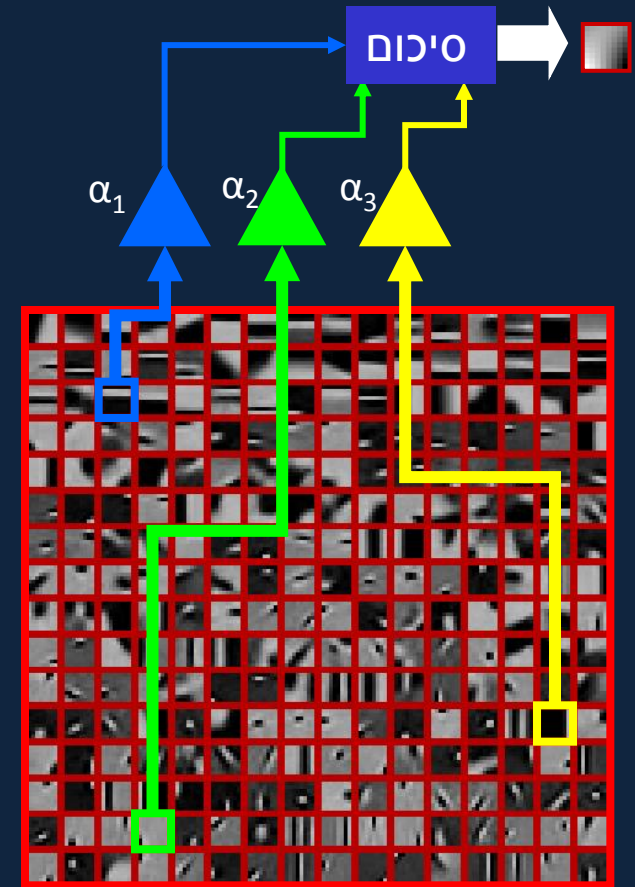
מכל אלו, רצוננו בפתרון הדליל ביותר (עם הכי הרבה אפסים).

וכך נולד לו בעת האחרונה פרק חדש באלגברה ליניארית העוסק בסוגיה זו, ובו סידרת תוצאות מרשימה



בעיה #1 במודל ופתרונה

בעיה 1: כיצד מפרקים פיסת תמונה
לאטומים הבונים אותה?



- נניח כי במילון 256 אטומים.
- נניח כי אנו יודעים שהפיסה שבידינו נוצרה ע"י ערבוב של 8 אטומים – עלינו לגלות מיהם ובאיזה מינונים.
- הדרך הישירה לפתרון בעיה זו: סריקה של כל האפשרויות של בחירת 8 אטומים מתוך 256.

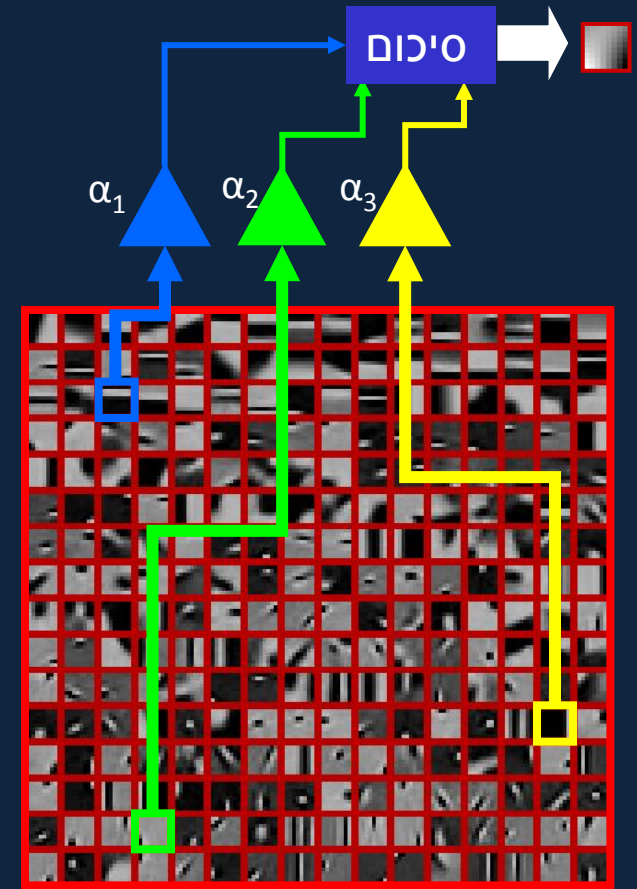
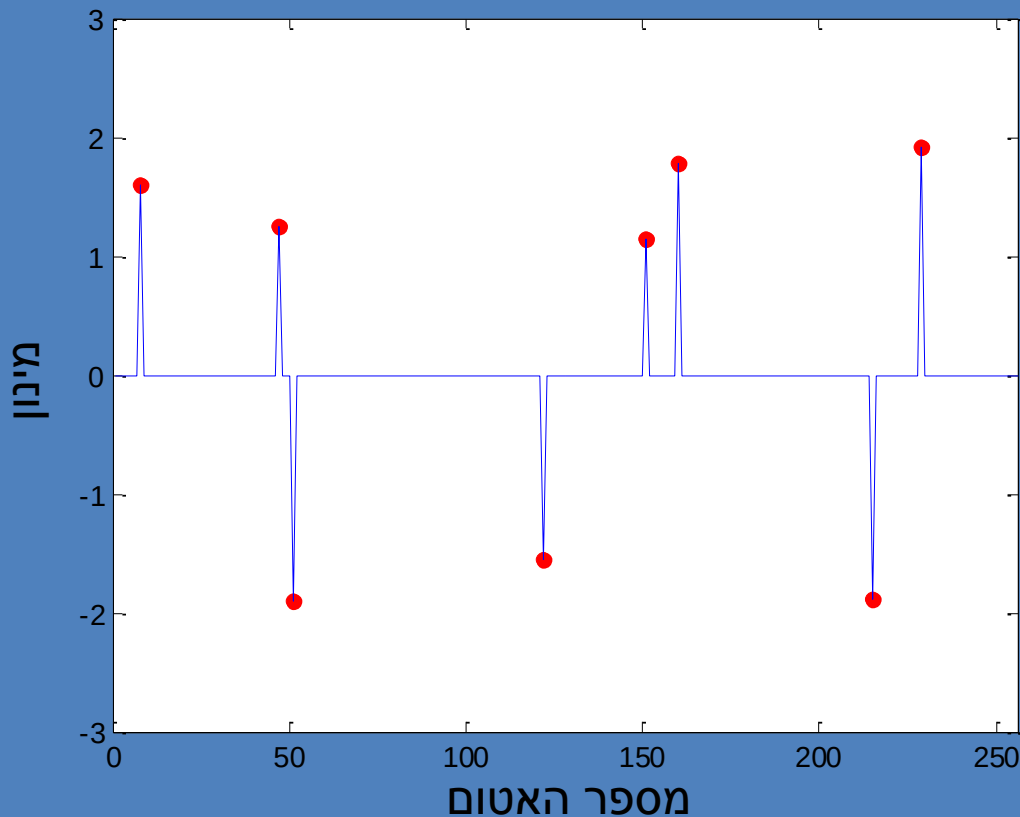
זהו סך של כ-400,000,000,000,000 (14 אפסים) אפשרויות.

- גם אם כל אחת מאלה תיקח מיליונית-שנה לבדיקה, נצטרך להמתין 311 שנים בטרם סריקה זו תסתיים !!!!!!!
- אז מה עושים?

בעיה #1 במודל ופתרונה

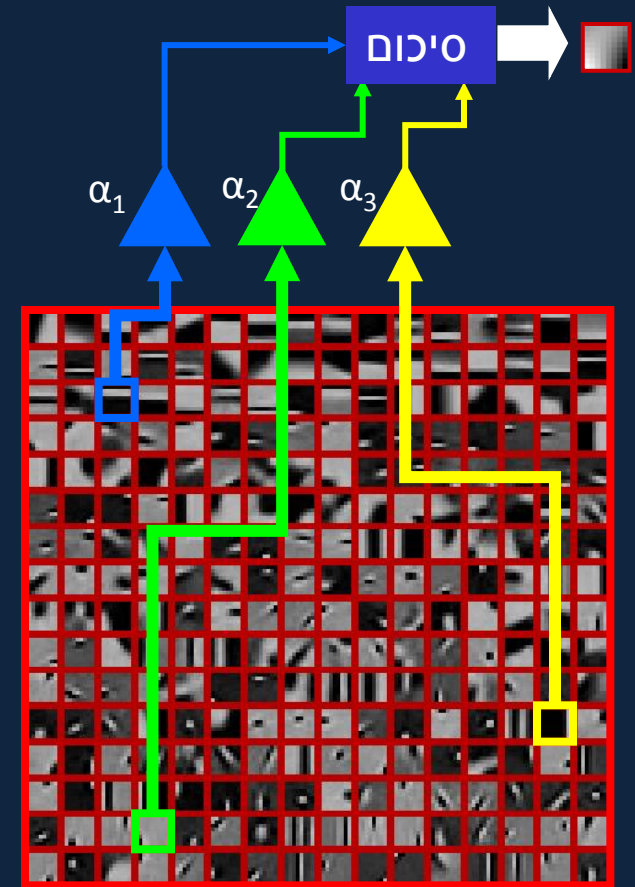
בעיה 1: כיצד מפרקים פיסת תמונה
לאטומים הבונים אותה?

- הפתרון ע"י שיטות קירוב שמוכחות לתפקד טוב.
- המחשת ה-OMP בפעולה לתסריט שתואר:



בעיה #2 במודל ופתרונה

בעיה 2: מהיכן יתקבל המילון?

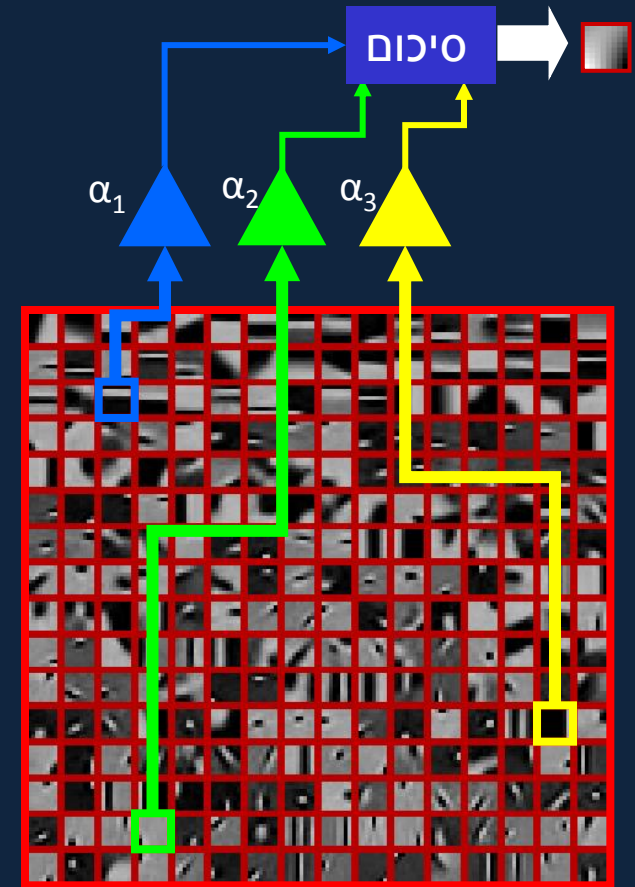


- ברור כי הצלחת מודל זה תלויה בהתאמת המילון להנחות המודל. ברור גם כי מילון זה משתנה ממקור מידע אחד לאחר (תמונות פנים, תמונות טביעת אצבע, אות קולי, מידע פיננסי, וכו').
- הפתרון: למידת המילון מתוך דוגמאות של מקור המידע אותו הוא אמור לשרת.
- בשנים האחרונות פותחו מספר שיטות ללימוד כזה עם הצלחה מרשימה. דבר זה מהווה מקור להצלחה העצומה של מודל זה, כיוון שהוא מצליח ל-"התאים עצמו" למידע בו הוא מטפל.

בעיה #3 במודל ופתרונה

בעיה 3: למה שמודל זה יעבוד? האם הוא גמיש דיו להתאים למגוון מקורות?

- ❑ התשובה הכללית היא שמודל זה גמיש וחזק מכל קודמיו.
- ❑ ביסוס תיאורטי רק החל. עבודה רבה עוד לפנינו בניסיון להסביר את מקורות כוחו של המודל.
- ❑ ביסוס מעשי: מודל זה נרתם בהצלחה למגוון בעיות (ולא רק בעיבוד תמונות – עיבוד מוזיקה ואותות דיבור, דימות אסטרונמי, מידע סיסמי, מידע פיננסי, למידה חישובית, ועוד ...) ומראה הצלחה מרשימה.



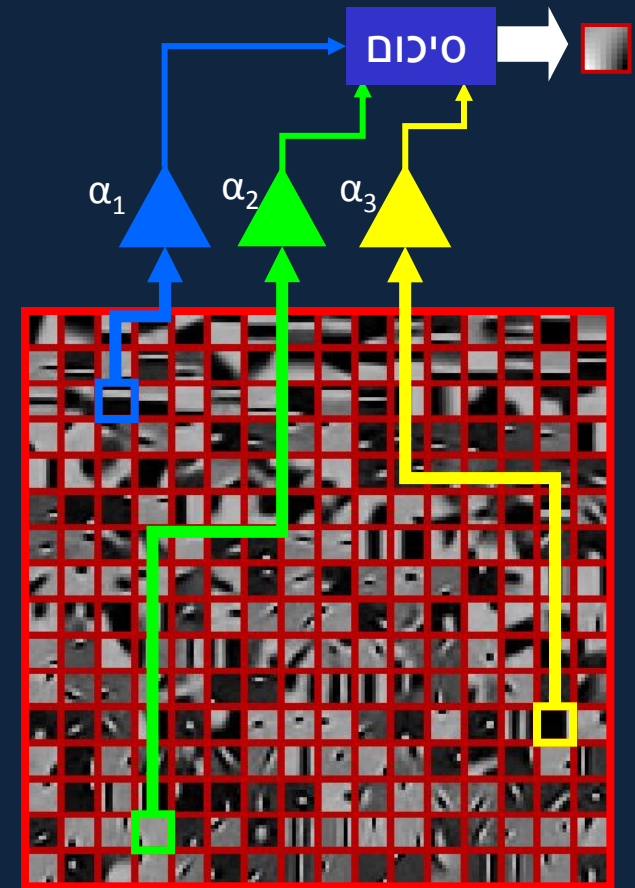
בעיות במודל ופתרון

בעיה 1: כיצד מפרקים פיסת תמונה
לאטומים הבונים אותה?

בעיה 2: מהיכן הקובץ המילון?

בעיה 3: למה שמודל זה יעבוד? האם הוא
גמיש דיו להתאמה למגוון מקורות?

כל שאלות אלו זכו למענה מוצלח
במהלך העשור האחרון. בשורה
התחתונה, ניתן להשתמש במודל זה
ובהצלחה מרשימה למגוון בעיות



מי ומי במלאכה?



Donoho, Candes – Stanford



Indyk – MIT



Tropp – CalTech



Mallat, Cohen – Paris VI



Baraniuk – Rice, Texas



Nowak, Willet – Wisconsin



Gilbert, Vershynin – U-Michigan



Coifman – Yale



Gribonval – INRIA – France



Romberg – GaTech



Starck – CEA – France



Lustig, Wainwright – Berkeley



Vandergheynst – EPFL – Swiss



Daubechies, Sapiro – Duke



Rao, Delgado – UC San-Diego



Friedlander – UBC – Canada



Do, Bresler – U-Illinois



Tarokh – Harvard



Tao, Yin – UCLA



Zhang – HK Polytechnique



Elad, Zibulevsky, Bruckstein, Eldar, Beck, Mendelson – Technion

David L. Donoho



□ דויד דונוהו הוא אחד המתמטיקאים והסטטיסטיקאים המובילים בעולם. הוא פועל מאוניברסיטת סטנפורד בארה"ב.

□ ללא כל ספק, יש לייחס את יצירת התחום של ייצוגים דלילים ויתירים למדען זה.

□ בשנת 2013 דונוהו זכה בפרס Shaw שנחשב ל-"נובל של המזרח".

□ בתיאור לפרס זה (ע"ס מיליון וחצי דולר) מוזכרת תרומתו המכרעת למודל ושימושיו.

THE SHAW PRIZE 邵逸夫獎

Announcement and Citation

Announcement

The Shaw Prize in Mathematical Sciences 2013

is awarded to

David L Donoho

for his profound contributions to modern mathematical statistics and in particular the development of optimal algorithms for statistical estimation in the presence of noise and of efficient techniques for sparse representation and recovery in large data-sets.

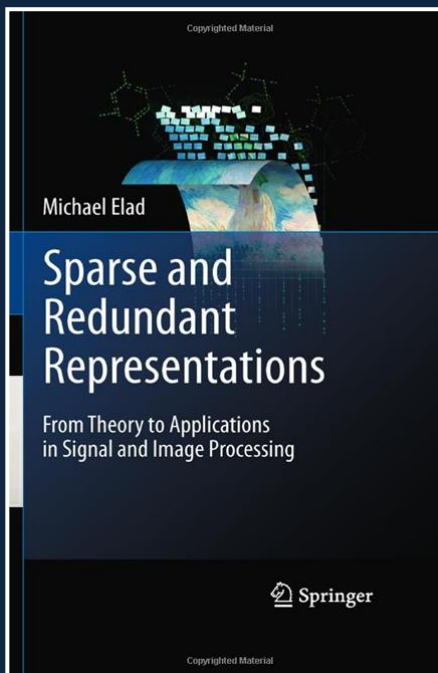
28 May 2013 Hong Kong

ספרים בתחום

□ בשנת 2010 פרסמתי את הספר הבא אשר היה הראשון והמקיף בתחום. ספר זה מבוסס על דפי ההרצאות שלי בקורס מתקדם שאותו אני מעביר כל שנה בטכניון.

□ ספר זה משמש כיום כבסיס לקורסים דומים במספר אוניברסיטאות (Oxford, Stanford, KTH, IISc, Duke, UCSD, Purdue, TAU).

□ בשנים 2010 – 2016 נכתבו מספר רב של ספרים נוספים המתארים תחום זה.



הורדת רעש מתמונת שול

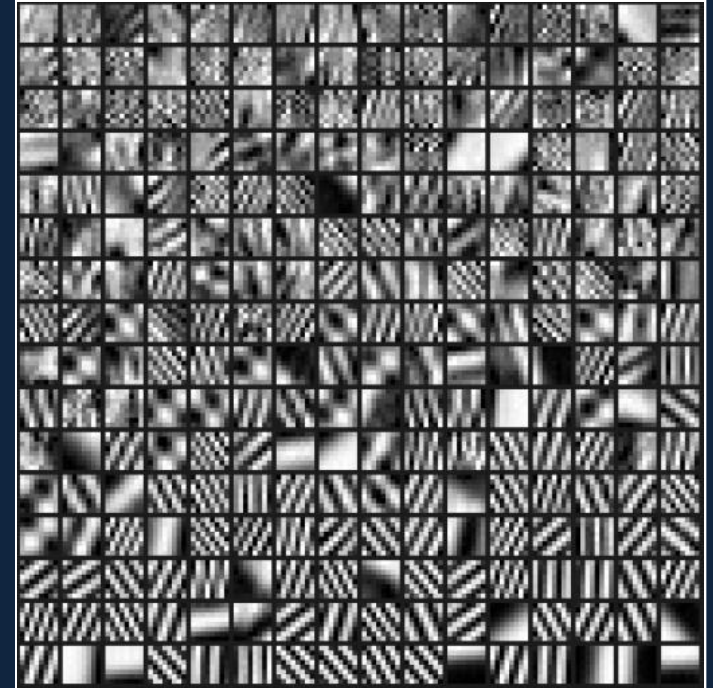
[עם מיכל אהרן, 2006]



תמונה רועשת



תוצאת הניקוי



ממזלוקות במלמד

להזכירכם, תהליך הניקוי הוא הבא:

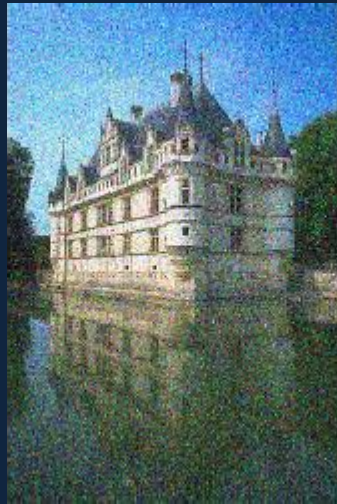
- ☐ הוצא כל פיסה מהתמונה.
- ☐ **הטלה למודל**: מצא את הפיסה הקרובה אליה ביותר שמקיימת את הנחת המודל.
- ☐ הנח את הפיסה החלופית בחזרה למקומה.
- ☐ חזור על תהליך זה לכל פיסה.
- ☐ אם ישנן חפיפות, מצע ביניהן.

ניקוי רעש בצבע

[עם ג'וליין מיירל וג'ירמו ספירו, 2007]



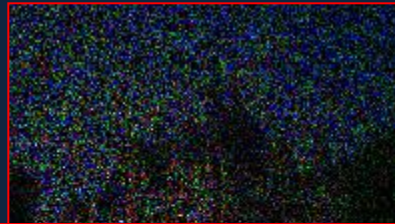
תמונת מקור



תמונה רועשת

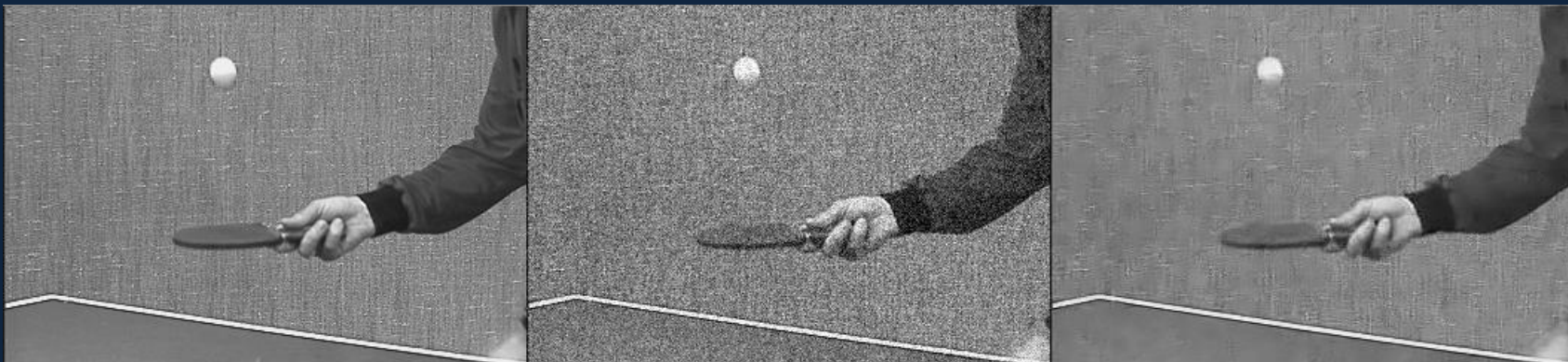
מילוי חורים

[עם ג'וליין מיירל וגירמו ספירו, 2008]



ניקוי סרטי וידאו

[עם מתן פרוטר, 2006]



סרט מקור

סרט רועש

תוצאה



סרט מקור

סרט רועש

תוצאה

דחיסת תמונות פנים

[עם אורי בריט, 2007]



דחיסת תמונות פנים

[עם אורי בריט, 2007]



סופר-רזולוציה

[עם מתן פרוטר, 2008]

סרט פגום עליו נעבוד

סרט זה נוצר מהמקור ע"י
טשטוש, דילול פי 3 בכל
ציר, והוספת רעש



סרט מקור
כבסיס להשוואה

תוצאת הגדלה

אופיינית (כפי

שמיושמת

בטלוויזיה ביתית



תוצאות שלנו

סופר-רזולוציה

[עם מתן פרוטר, 2008]

סרט פגום עליו נעבוד

סרט זה נוצר מהמקור ע"י
טשטוש, דילול פי 3 בכל
ציר, והוספת רעש



סרט מקור
כבסיס להשוואה

תוצאת הגדלה
אופיינית (כפי
שמושמת
בטלוויזיה ביתית



תוצאות שלנו

שחזור טומוגרפי

[עם יוסי שטוק ומיכאל צ'יבולבסקי, 2008]

תמונת מקור
של חתך המוח
בצילום CT



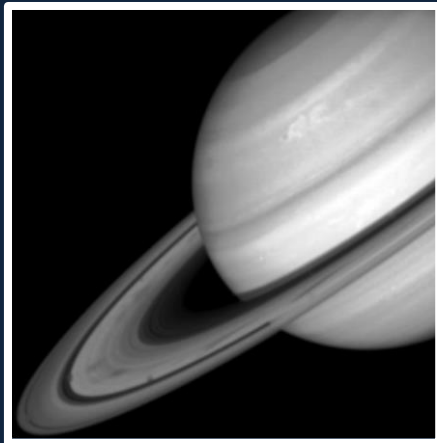
שחזור טומוגרפי
רגיל עם רמת
קרינה קטנה פי 5

שחזור טומוגרפי
רגיל עם רמת
קרינה רגילה
במכשיר ה-CT

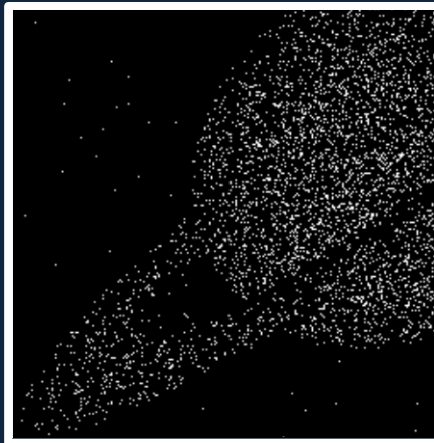
שחזור טומוגרפי
**משופר המושתת
על מודל הדלילות**
עם רמת קרינה
קטנה פי 5

ניקוי רעש פואסוני

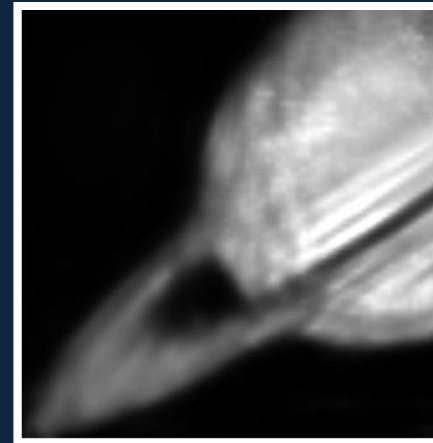
[עם רג'ה ג'יריס, 2013]



מקור



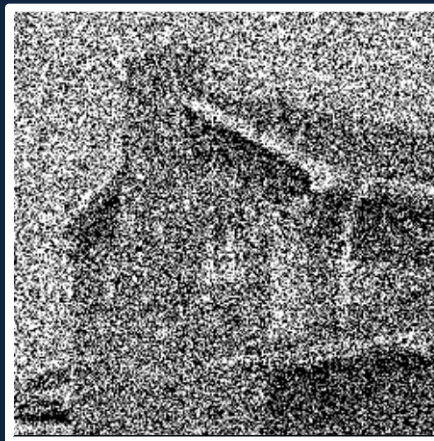
מדידה רועשת



ניקוי\שחזור



מקור



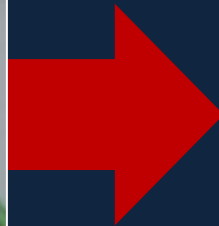
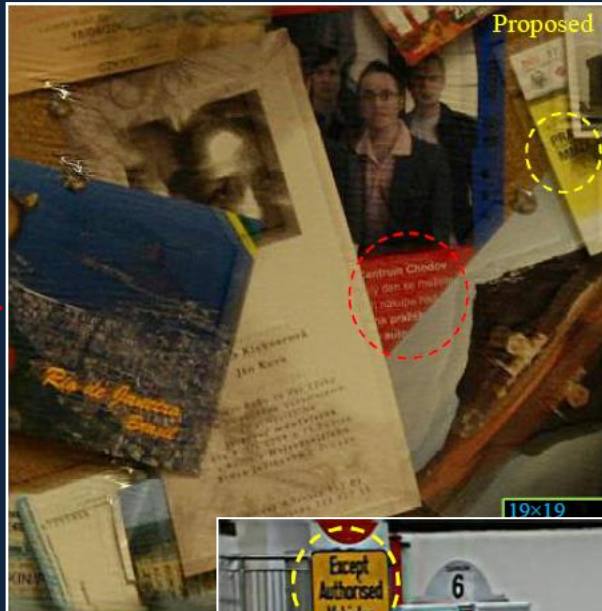
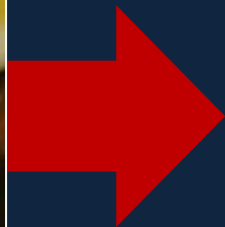
מדידה רועשת



ניקוי\שחזור

שחזור עיוור

[עם וונזה שאו, 2014]



לאן מכאן?

□ אנו במאבק מתמיד להשביח ולהכליל את המודל שנועד לתיאור תמונות ואז למנפו לפתרון מוצלח יותר של הבעיות שהוצגו:

- קרנליזציה
- הסרת מגבלת הגודל באימון מילון
- עבודה במולטי-סקאלה
- פרמטריזציית יתר

□ שאלת יסוד: למה מותר לעבוד בטלאים? מהו המודל האמיתי שגישה זו משרה? מיהן התמונות הנענות למודל זה? מהו המיזוג הנכון בין הטלאים לקבלת תוצאה טובה יותר?

□ סינטזה של תמונות – יצירת תמונות יש מאין - כיצד?

□ ועוד ועוד ...

עיבוד תמונות – סיכום

- ❑ עיבוד תמונות הוא תחום חם באקדמיה בארץ ובעולם, ובטכניון יש קבוצה גדולה ואיכותית של חוקרים בזירה זו.
- ❑ תחום זה חזק מאוד גם בתעשייה המקומית (IBM, KLA, Applied-Materials, Orbotech, מעבדות HP, אלביט-אלאופ, Mobileye, ועוד חברות וסטרט-אפים רבים).
- ❑ בלב התחום עומד רעיון פשוט: המרת תמונה לאוסף מספרים וביצוע חישובים עליהם בעזרת מחשב. מסתבר כי האפשרויות העומדות בפנינו בהקשר זה רבות ומגוונות, דבר המסביר את הפופולאריות של התחום והשפעתו (במחקר ובמוצרי-צריכה).
- ❑ בהרצאה זו קיבלנו טעימה ראשונית של תחום זה, עם דגש על מודל מבוסס דלילות ושימושיו.
- ❑ הערה: מתמטיקה מהווה נדבך מרכזי בעיבוד תמונות, והרצאה זו לא שיקפה זאת כלל (מסיבות ברורות).

סיימנו !!!

תודה רבה