

דיגיטלי

עיבוד תמונות

ההרכב האטומי של מידע ויזואלי – גישות
חדשניות בעיבוד תמונות

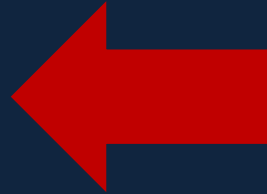
מיכאל אלעד
הפקולטה למדעי המחשב – הטכניון

הרצאה במסגרת הקורס
תגליות מדעיות (114010)
18 ביוני 2018

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:

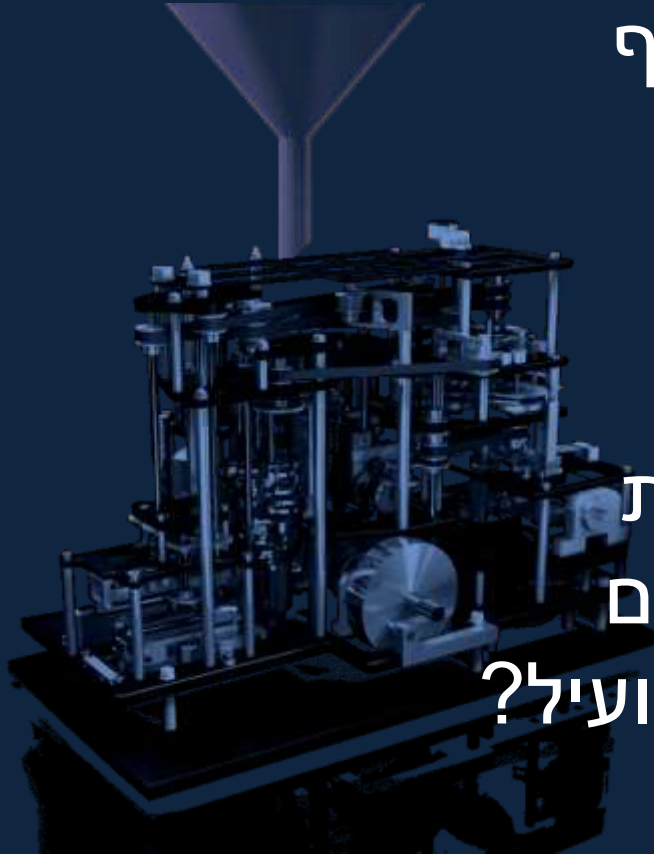
□ איך תמונה עושה דרכה אל המחשב?

← 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?

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



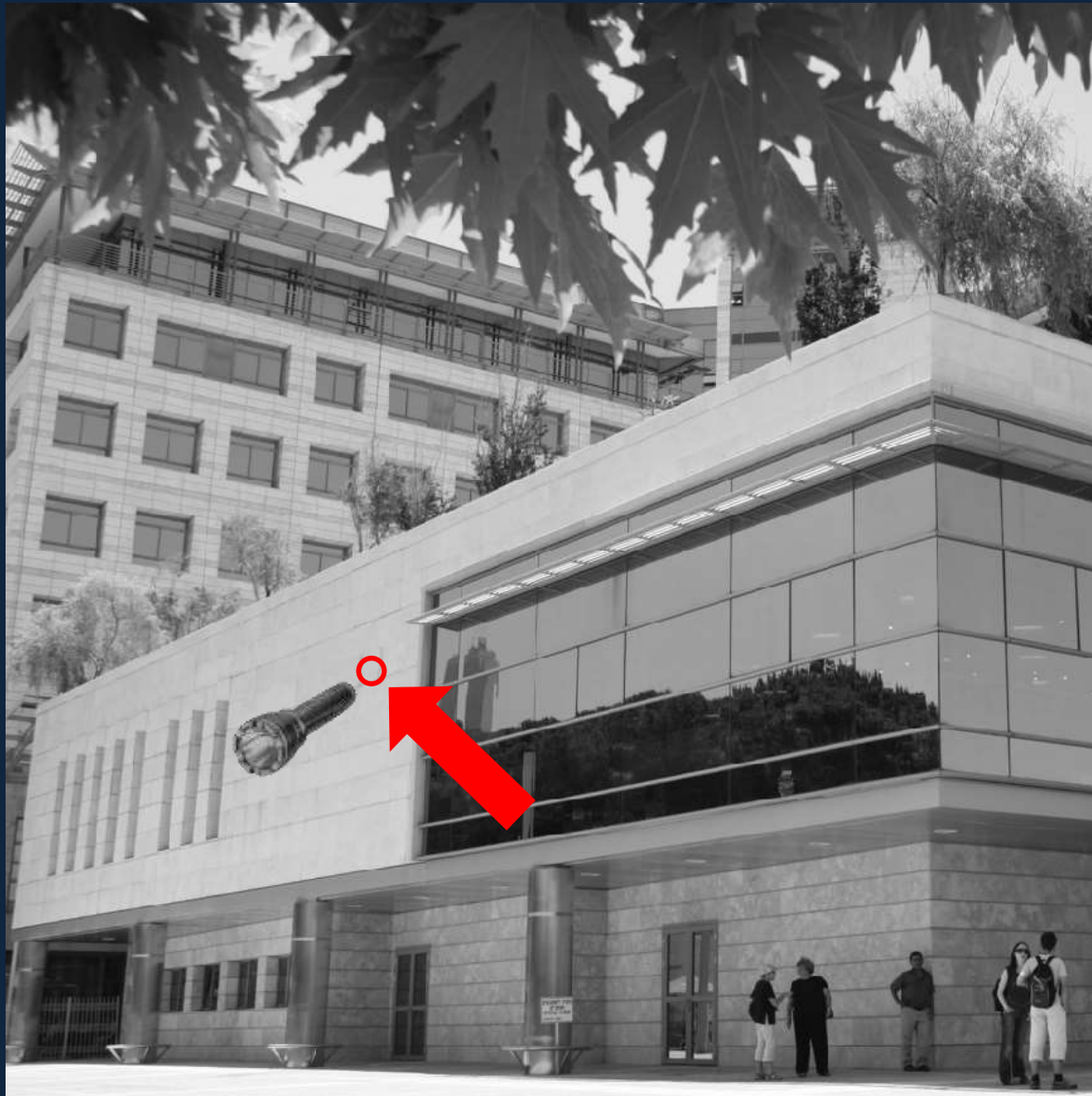
הפיכת תמונה לאוסף מספרים?



□ 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?

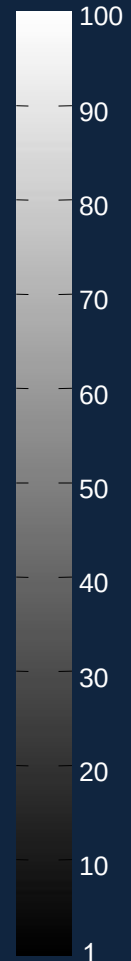


אוסף גווני האפור המעורבים
בבניית התמונה

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:

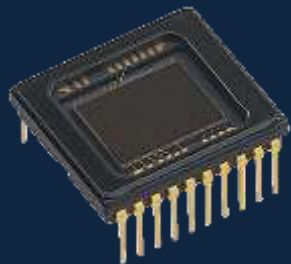
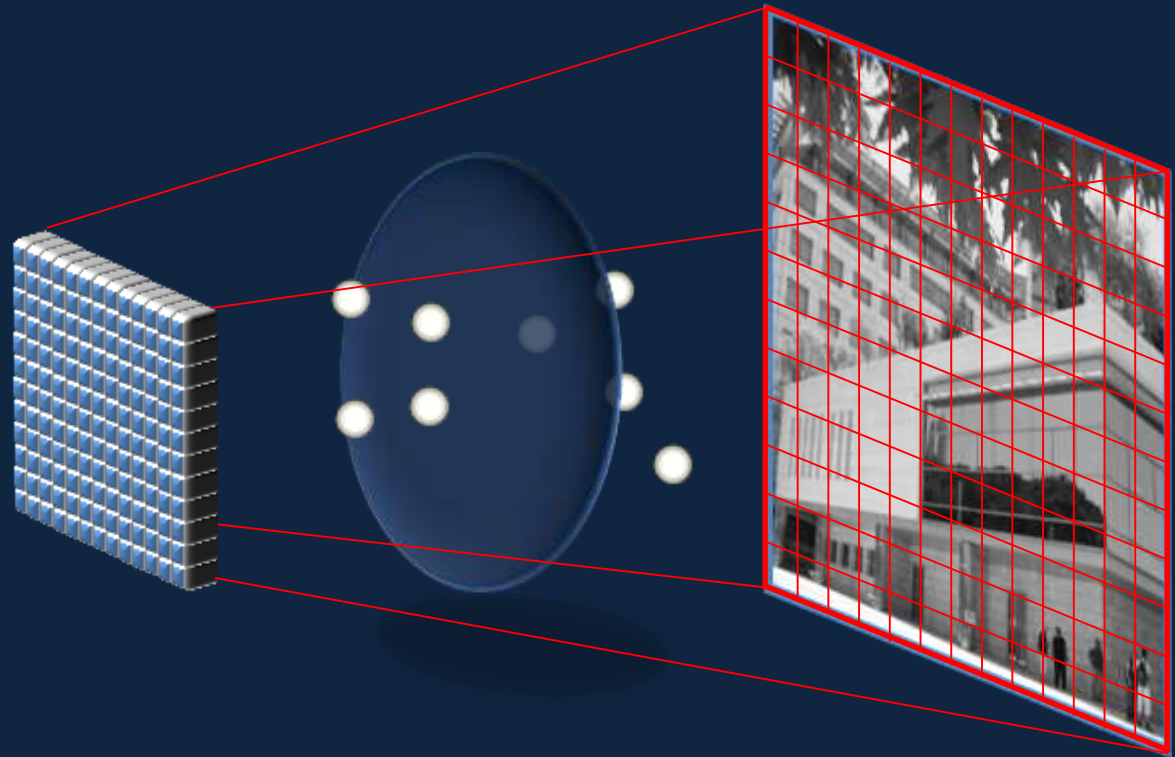
- טכנולוגית ה-**CCD** הומצאה ע"י Boyle & Smith ב-1969.
- לצד CCD קיימת גם טכנולוגיית **CMOS** שהומצאה ב-1981.

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

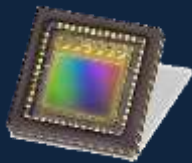


הפיכת תמונה לאוסף מספרים?

□ 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?

11080809	122010	172739	344840	192015	151218	2121018	133230	171516	161616	172021	232023	222332	212124	2421
10081011	100911	172053	717264	392317	141721	232322	211827	551718	171818	171817	222424	245224	243438	382328
10081119	121315	251937	757650	241815	141425	252423	274850	232020	273120	255123	532632	447232	2855	72475449
12111221	152023	232829	614357	372018	182052	225624	246068	212022	222623	233522	296976	613172	7670	7663
34422023	212623	263930	577955	222830	242221	72627	223530	352222	232234	242423	296961	6355	7367	737673
71682729	252527	315035	427135	425942	222222	202727	265624	245224	252425	344126	252633	4550	5663	59627573
63493447	252630	305140	535866	784331	252829	242628	245529	405325	282925	316928	262536	4040	4554	50637573
57413938	313333	394558	617479	807973	323130	292828	585678	492628	282628	394127	282838	3536	4746	426364
47434360	433736	424346	535563	707865	515951	313228	303067	794927	433127	332730	273239	2429	2649	33294048
37423935	212635	374140	474245	505258	667469	404928	323046	785359	524529	293132	333739	3626	2625	29282636
35393828	293138	342327	333939	484643	495155	396232	343134	636379	656452	293032	294763	5031	3029	36282529
37596261	564644	403239	392929	323746	474142	503745	432338	470676	764040	313024	2039	6663	4245	3739322526
49605343	486564	635750	443839	433033	263443	434352	543544	556263	604539	282121	347069	6558	4136	372214
49615142	436644	445056	636457	514241	433836	332633	383744	424241	434857	383730	305569	7070	6665	6463513310
45626257	526444	454042	424963	566265	605345	414144	323028	373838	426048	566570	707171	7165	6666	66646458
61646565	656464	605449	465059	454861	495461	665953	434041	373934	446667	717172	717171	7167	5861	6364636360
59624345	556463	666666	666564	545359	464344	445046	576660	535159	697117	727271	727163	5147	3840	4554606259
56614646	545943	426556	586567	676665	635652	442374	425886	707071	727272	726856	474958	5946	4442	39384146
60635954	575745	446649	465754	495762	656667	523438	476870	717272	727063	515055	595339	2922	2329	34404240
63646465	656464	616653	486053	485140	465357	353259	697172	736956	505361	564529	344554	4643	3326	202329
61554448	646163	646465	656564	604732	373956	637071	707071	716453	515759	483333	455355	5555	4647	4547474232
61554644	655143	476355	586465	665542	446470	707170	665551	536152	382942	545757	565555	5343	4746	47474745
63595348	645048	526248	506146	456267	697071	696050	505756	433038	505557	575757	525353	5447	4542	43434545
59616365	666661	616161	554655	596769	707070	675549	535747	343444	555656	555653	525353	5656	4845	48474444

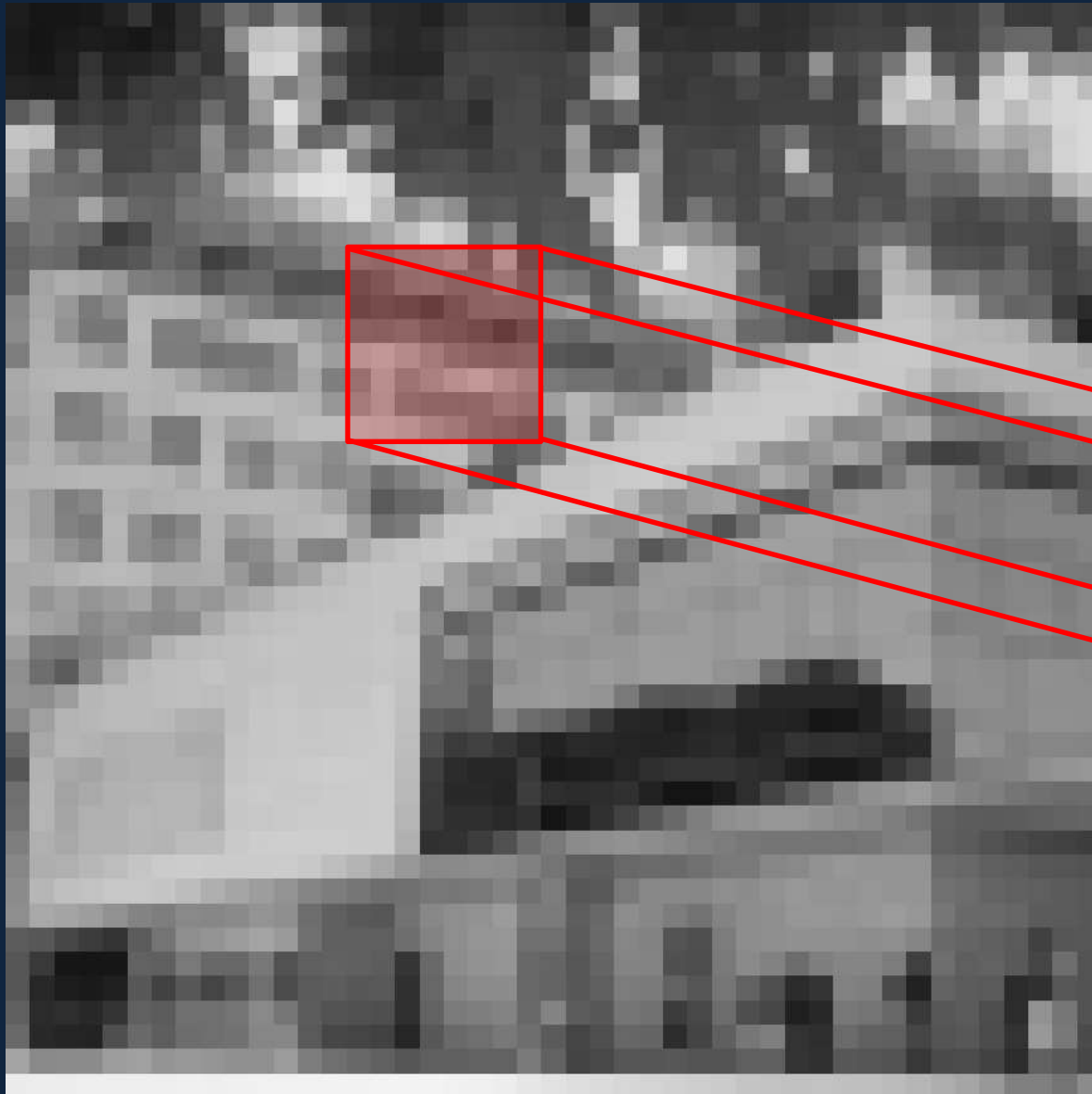
□ זהו אוסף המספרים שייצג את התמונה.

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

□ המחשב מקבל
את המספרים
ולא יותר!

60	52	56	53	55	58	49	55	53	59	62	66	67	68	69	70	70	44	58	52	38	33	44	54	53	52	55	53	53	55
61	57	55	49	52	50	48	51	61	66	68	69	69	69	69	70	70	67	47	34	41	52	54	55	55	53	50	53	54	55
55	43	42	46	50	54	63	66	67	68	69	70	69	69	69	70	70	69	41	51	41	54	52	53	52	54	54	56	55	55
51	40	33	49	61	66	67	68	69	68	68	69	69	69	69	70	70	69	42	39	36	51	53	55	54	55	54	56	56	55
51	51	57	65	66	67	67	68	67	68	70	70	69	70	70	72	69	39	40	34	54	54	55	54	52	43	30	30	31	3
47	58	64	65	66	67	66	63	63	69	70	71	70	71	71	72	68	32	31	33	46	38	35	28	20	14	13	11	14	1
36	61	65	64	62	63	62	61	61	70	70	71	71	71	72	72	67	28	21	23	19	15	12	16	14	14	13	13	15	1
31	64	59	59	61	63	62	63	61	70	71	71	72	73	72	72	66	22	16	14	14	21	10	11	11	14	17	19	19	1
40	64	58	61	63	64	64	64	62	71	72	71	71	72	72	72	65	20	15	15	13	23	17	16	17	18	11	08	08	1
41	65	59	63	63	65	64	64	62	70	71	72	72	72	72	72	64	20	17	17	15	17	08	12	18	25	33	40	47	5
46	62	61	63	63	65	64	67	67	71	73	73	73	73	73	72	62	17	19	23	31	40	46	50	52	52	50	48	46	4
49	62	63	65	67	71	72	73	72	72	72	71	67	63	59	58	49	50	50	50	45	41	33	33	37	38	28	41	4	4
51	65	68	69	71	71	70	66	62	58	55	51	47	44	41	39	39	42	42	43	47	40	44	31	32	44	49	49	48	5
52	60	58	55	51	46	45	49	48	49	53	51	40	35	32	31	41	49	51	52	55	43	44	34	37	51	48	44	41	4
33	31	24	21	18	33	42	51	53	55	58	54	40	34	34	34	39	47	51	53	53	39	40	33	38	48	47	30	28	4
32	20	09	08	09	35	34	43	36	35	43	28	34	35	34	33	19	39	50	52	53	36	36	31	36	47	47	28	28	4
31	14	11	10	12	32	24	32	25	30	41	27	33	33	31	32	17	38	47	49	50	36	36	32	35	44	43	35	31	4
34	15	17	15	19	35	34	41	41	42	50	43	33	30	29	28	17	36	44	45	47	37	47	33	32	42	41	21	26	3
37	14	13	13	30	38	34	39	39	41	48	48	32	26	25	24	14	33	38	39	43	39	33	25	29	37	36	16	24	3
59	51	52	52	57	58	54	55	54	52	52	56	45	40	38	35	32	34	34	35	35	44	34	25	26	31	31	32	31	3
79	80	80	80	80	80	80	80	81	81	81	81	81	81	81	82	82	82	82	82	81	80	79	78	76	75	74	73	72	70

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

הפיכת תמונה לאוסף מספרים?



- ❑ החוק להגדלת פיקסציה של 100,500 שקלים ל-1,000,000 פיקסלים (פי 400).
- ❑ בעד המשך התהליך: נצליח לראות פרטים יותר קטנים.
- ❑ נגד המשך התהליך: יידרש יותר מקום בזיכרון ויותר זמן לעיבוד תמונה זו.

- בשלב מסוים, הגדלת התמונה והקטנת הפיקסלים לא יביאו יותר מידע – משפט הדגימה של Shannon-Wittaker-Nyquist-Kotelnikov קובע מהי נקודה זו.

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

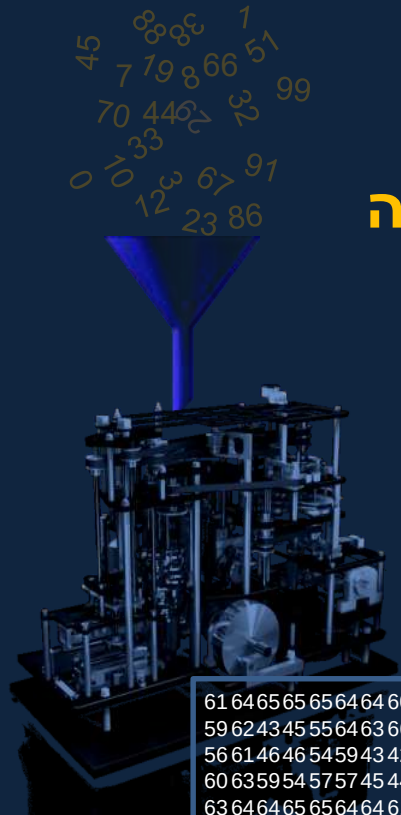


ערך ממוצע
(מתוך 100)
הוא 10



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

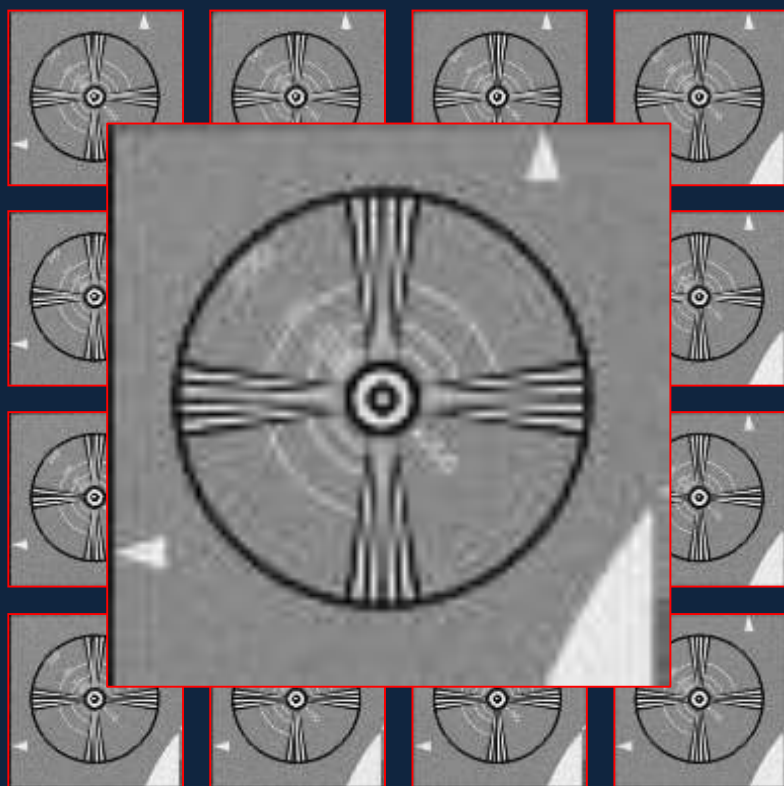
בעיה 2: שחזור מטשטוש



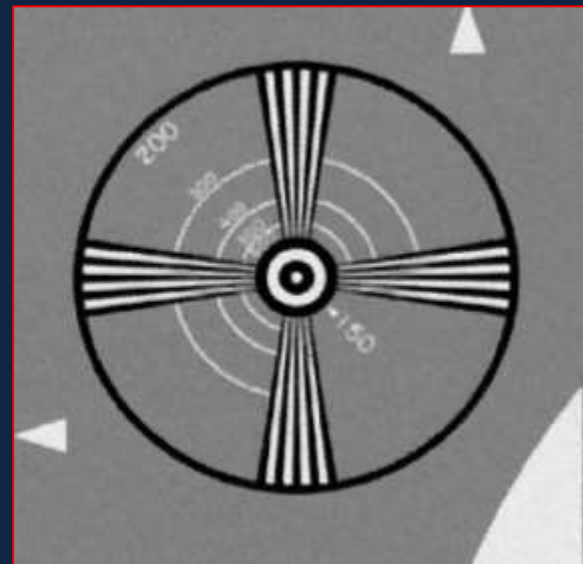
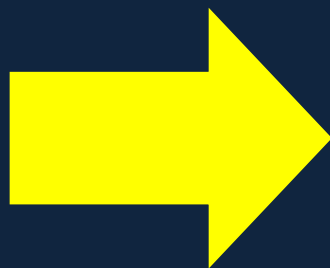
תוצאות אלו נשענות על
עבודתם של Fergus,
Singh, Hertzmann,
Roweis, and Freeman
מאוניברסיטת MIT,
ארה"ב (2006)

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)



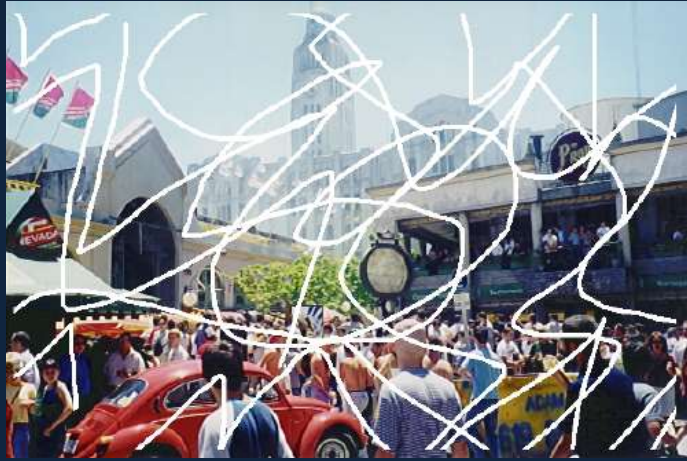
בעיה 5: תיקון תאורה



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



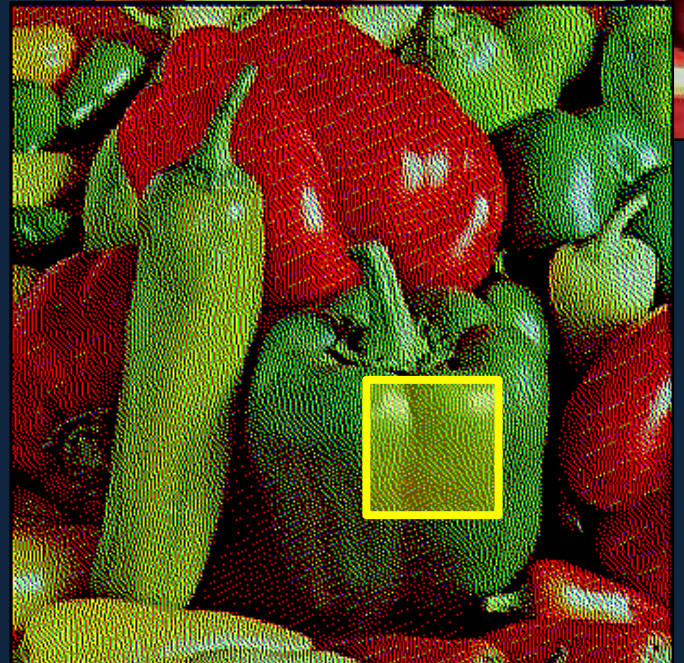
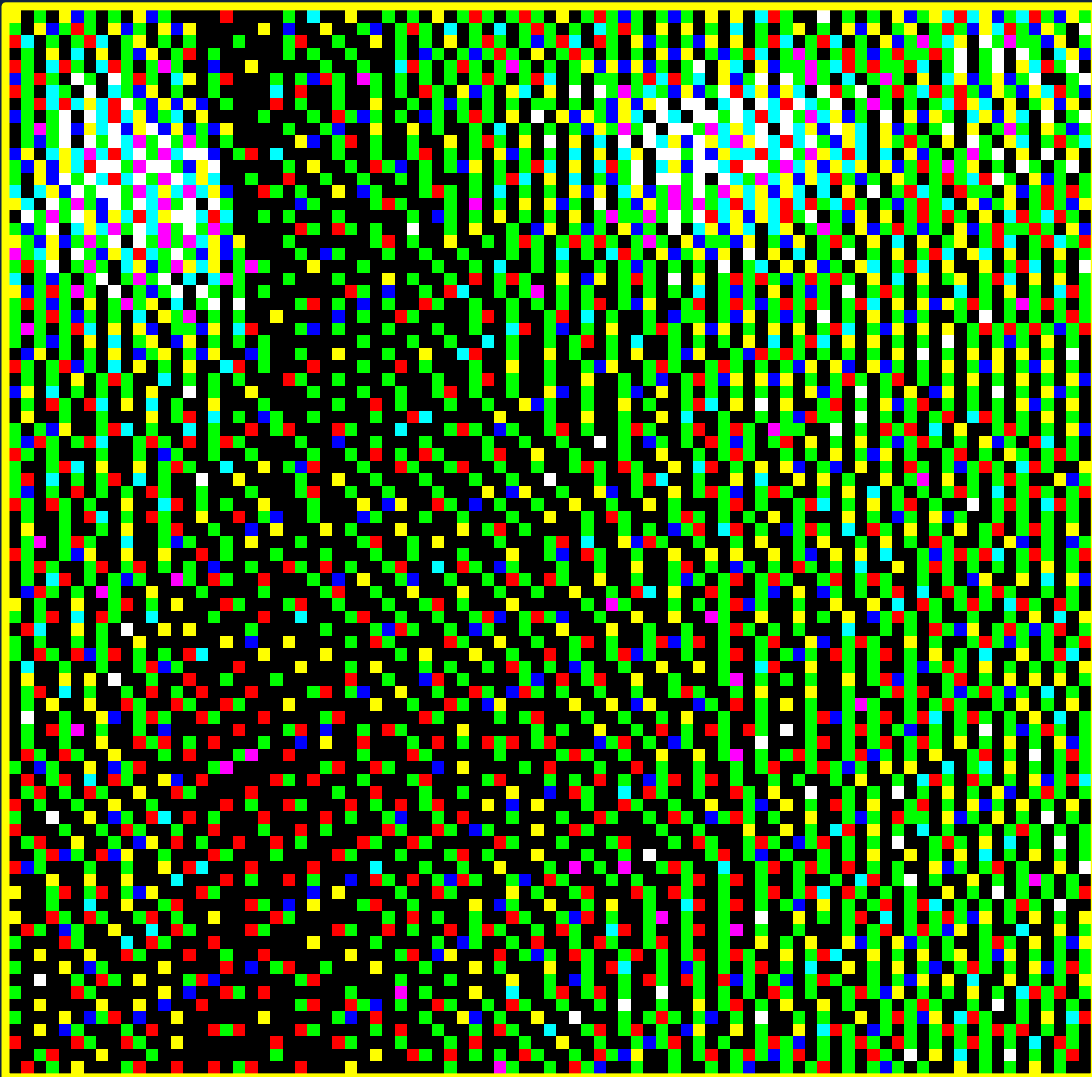
בעיה 6: מילוי חורים בתמונה



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



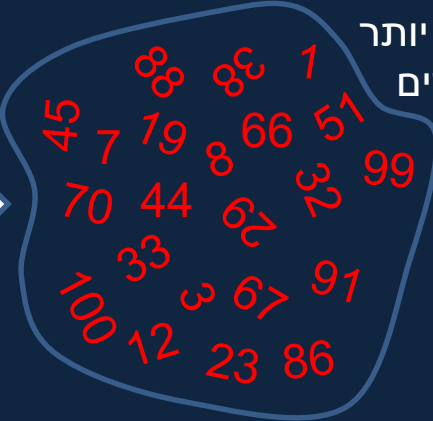
בעיה 7: הדפסה בסט צבעים מוגבל



בעיה 8: דחיסת תמונות



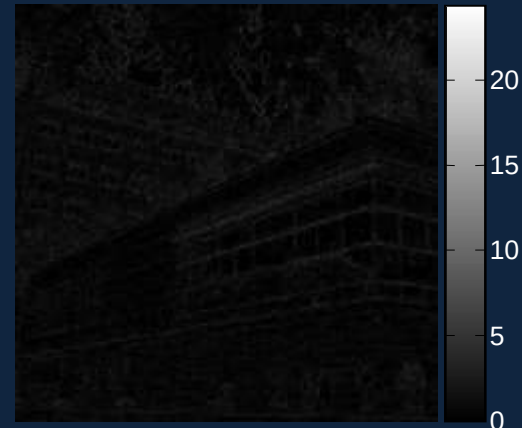
כמות קטנה יותר
של מספרים



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.



בעיה 9: העברת סגנון

$$C \left\{ \text{Image of a house} \right\} + S \left\{ \text{Image of a face} \right\} = \text{Image of a house with face style}$$

תוצאה זו נלקחה מעבודתי עם Peyman Milanfar ב-Google-Research (2016)



תוצאות אלו נלקחו מעבודתם של Gatys ושותפיו מגרמניה (2016)

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



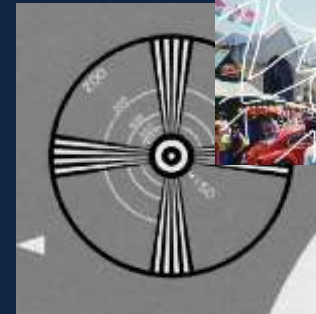
שיתופי
פעולה
בטכניון



שיתופי
פעולה
בעולם

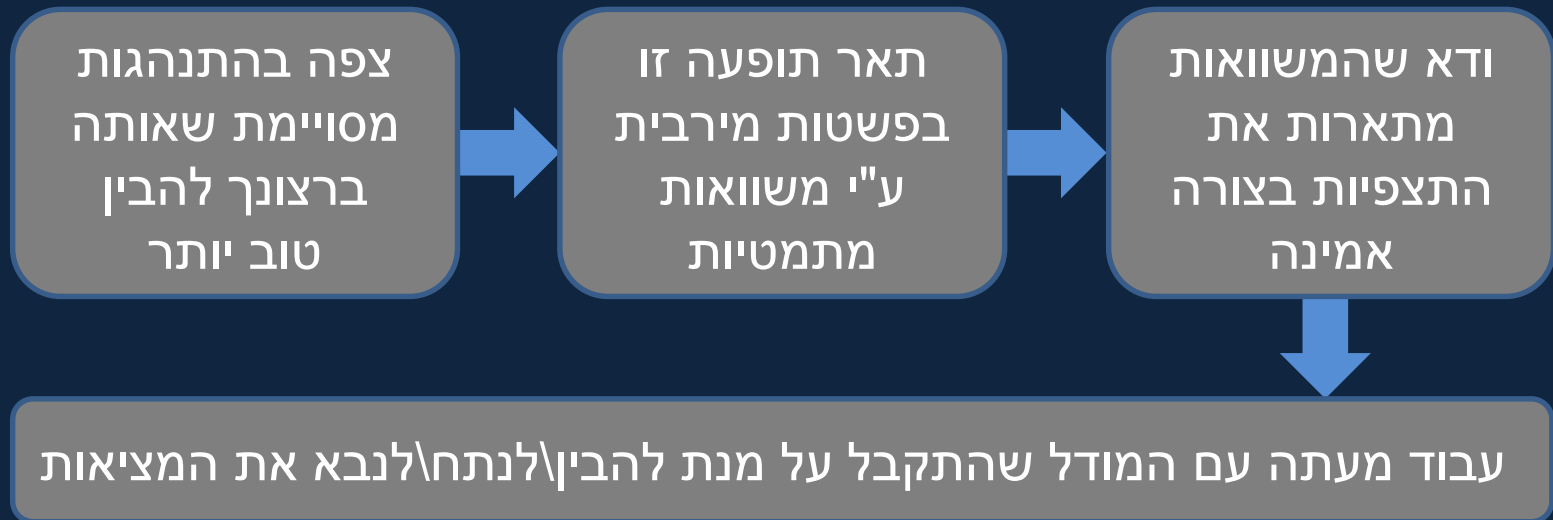
המודל וחשיבותו

- 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:

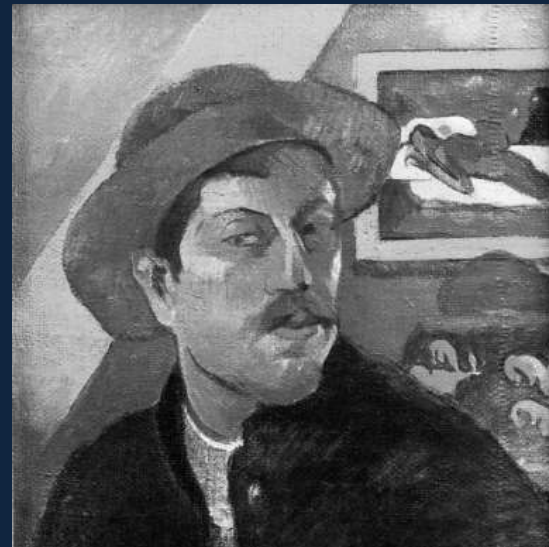
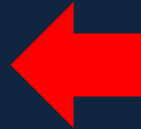
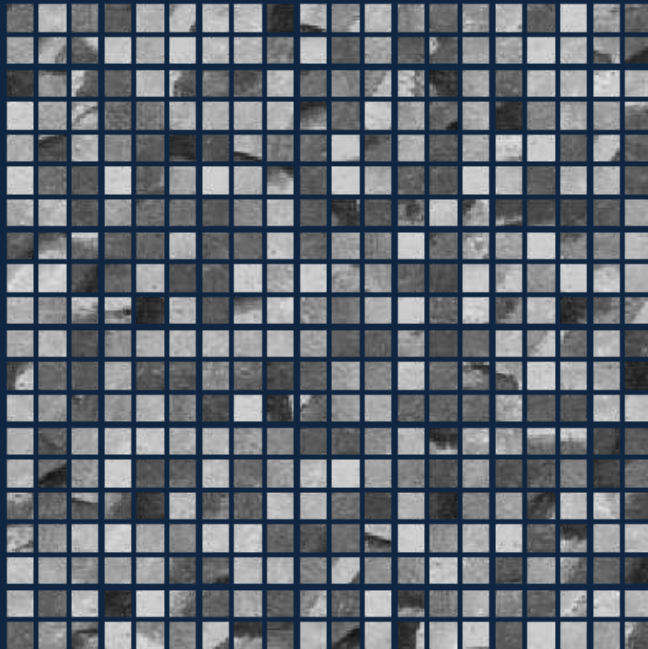


□ חישבו על כך – כל הפיזיקה בנויה בצורה זו. לשם דוגמה, אלוהים מעולם לא כתב את המשוואה $f=ma$ הקושרת בין מאסה, תאוצה וכוח. אנו, המדענים ניסחנו זאת בנסותנו למדל את המציאות.

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.

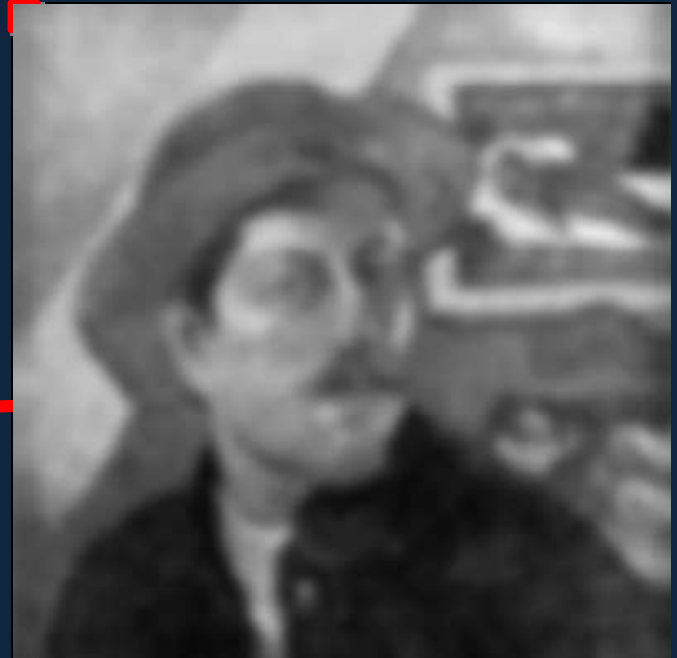


איך נשתמש במודל?



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.

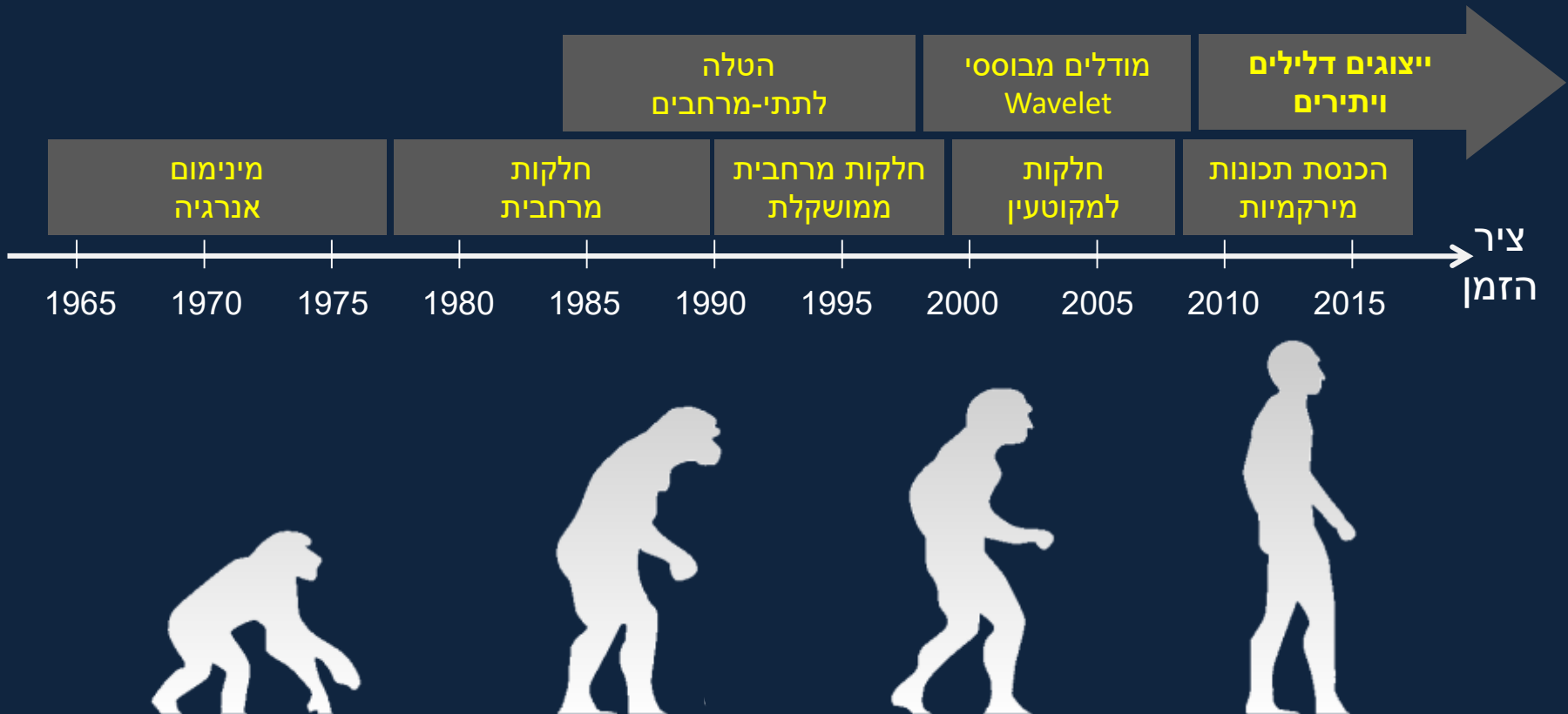


תוצאת
התהליך

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



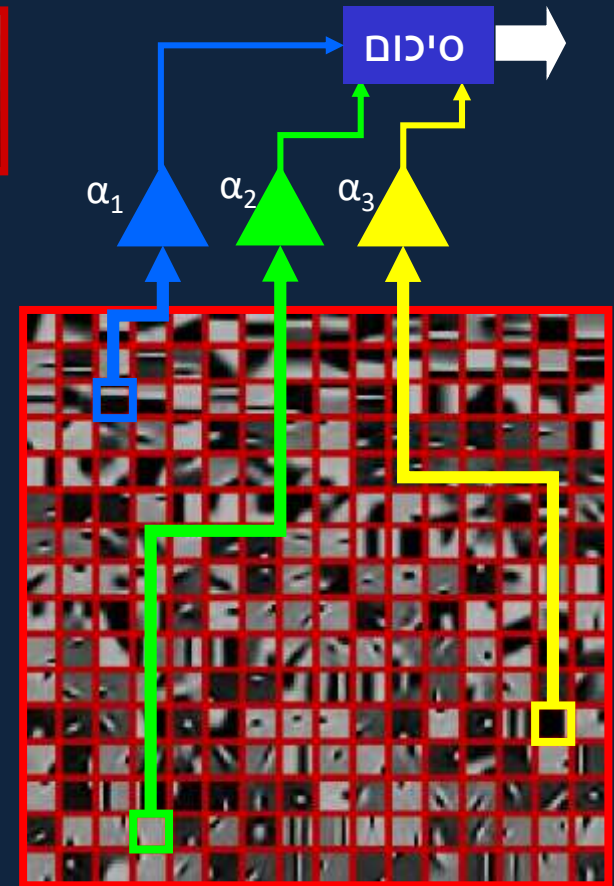
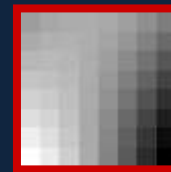
ה-"כימיה" של התמונות – מודל חדש

□ 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.

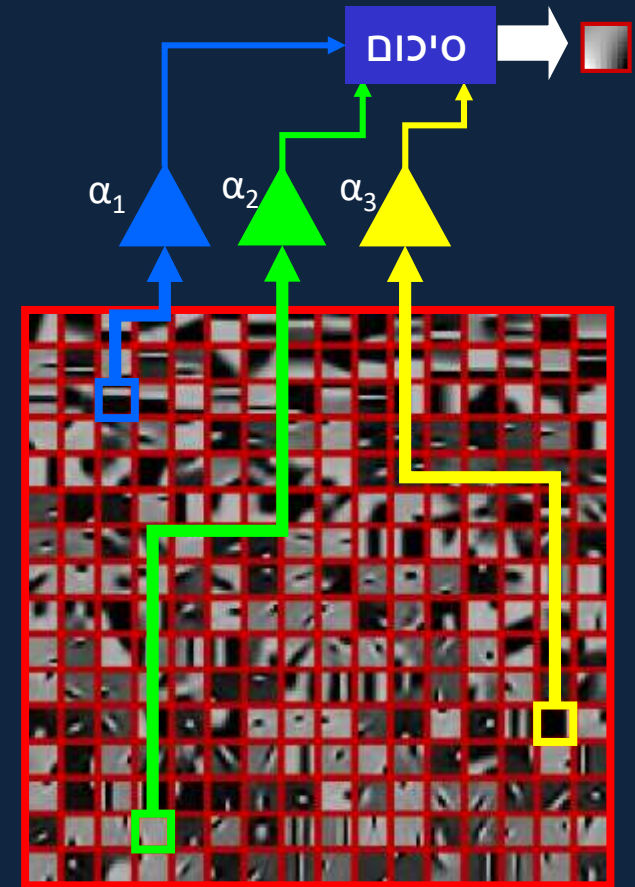
הסתכלות אחרת: המילון מהווה את הטבלה המחזורית בכימיה של הפיסות שלנו. אנו מתייחסים לכל פיסה בתמונה כמולקולה המורכבת ממיעוט של אטומים במינוחים שונים.



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:

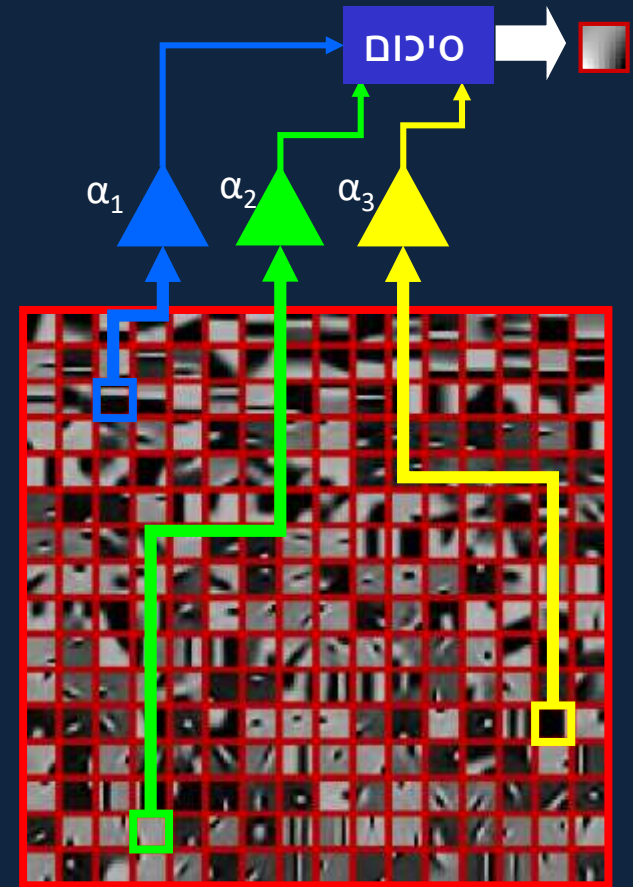


The diagram illustrates the linear system $D\alpha = X$. On the left, a red grid representing matrix D has dimensions $m > n$ (width) and n (height). To its right is a vertical vector α of length n , with a few yellow squares indicating non-zero elements. An equals sign follows, then another vertical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

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

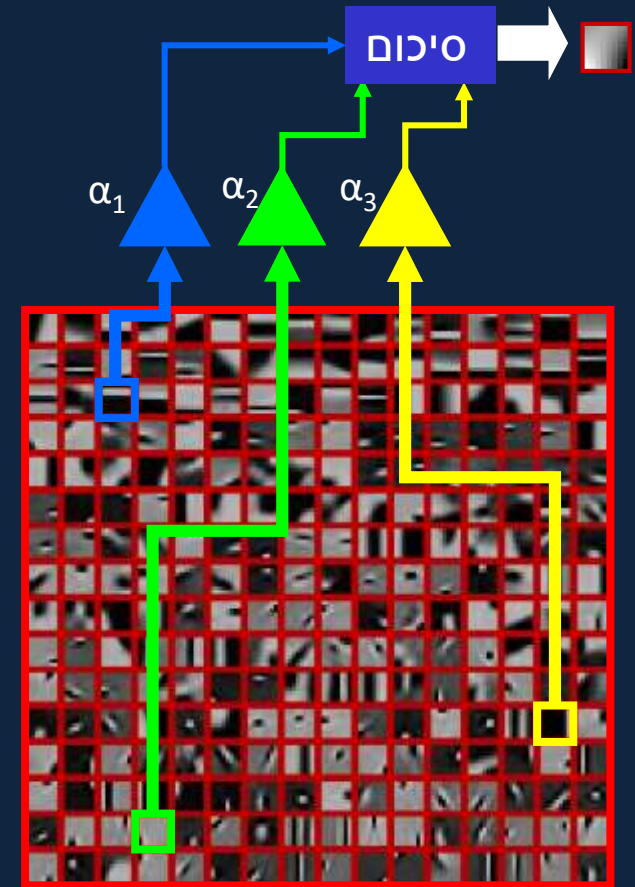
מכל אלו, רצוננו בפתרון הדליל ביותר (עם הכי הרבה אפסים).

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.

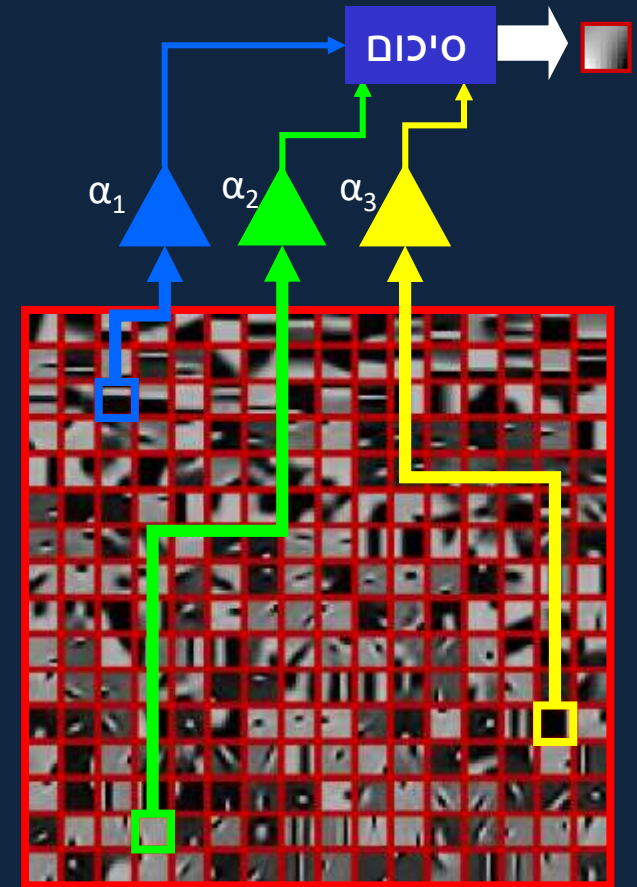
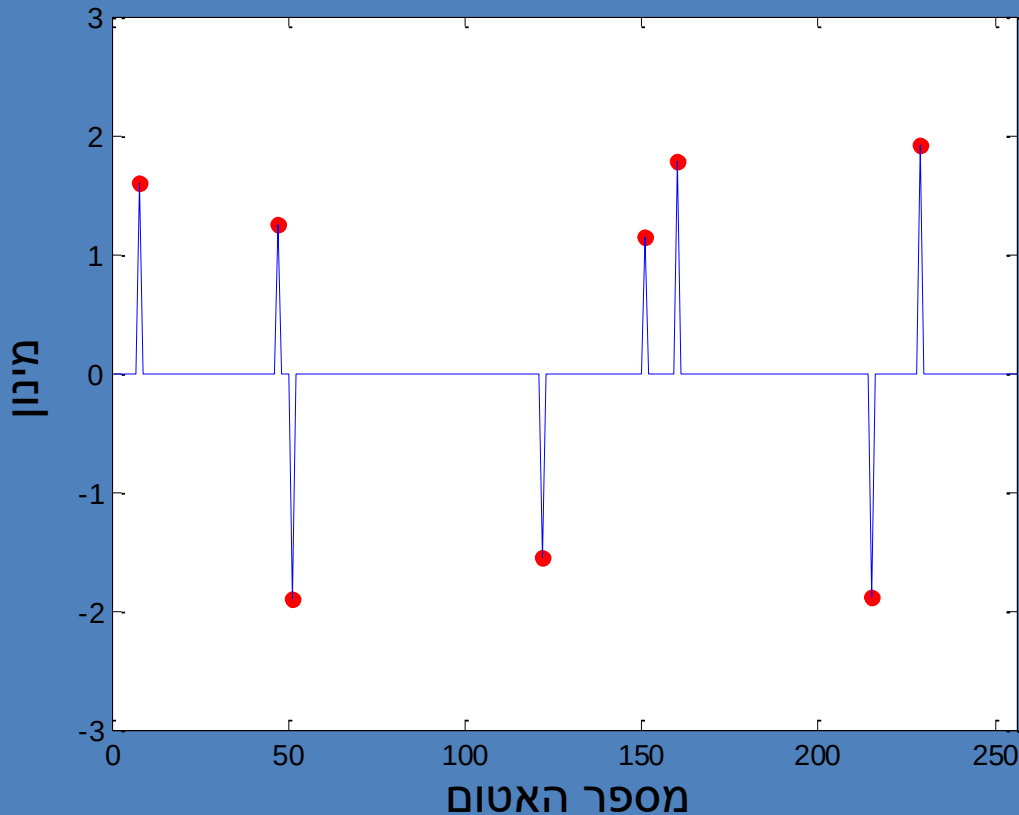
זהו סך של כ-400,000,000,000,000 (14 אפסים) אפשרויות.

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

בעיה #1 במודל ופתרונה

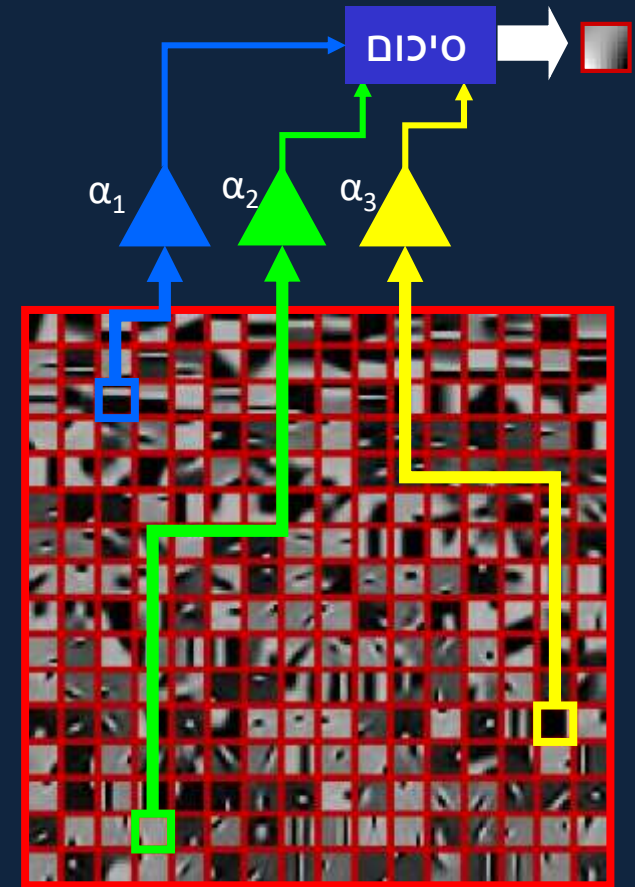
בעיה 1: כיצד מפרקים פיסת תמונה
לאטומים הבונים אותה?

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



בעיה #2 במודל ופתרונה

בעיה 2: מהיכן יתקבל המילון?

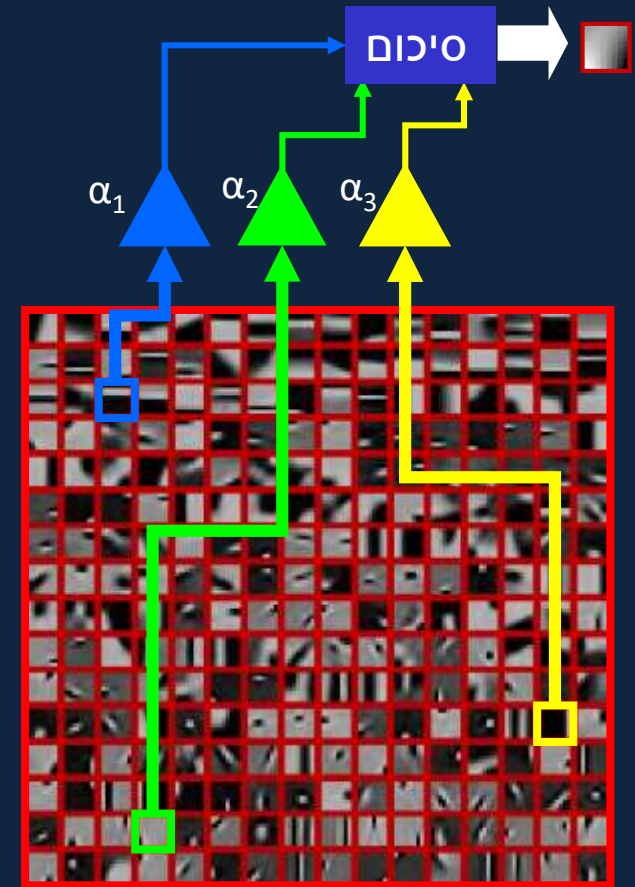


- ברור כי הצלחת מודל זה תלויה בהתאמת המילון להנחות המודל. ברור גם כי מילון זה משתנה ממקור מידע אחד לאחר (תמונות פנים, תמונות טביעת אצבע, אות קולי, מידע פיננסי, וכו').
- הפתרון: למידת המילון מתוך דוגמאות של מקור המידע אותו הוא אמור לשרת.
- בשנים האחרונות פותחו מספר שיטות ללימוד כזה עם הצלחה מרשימה. דבר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



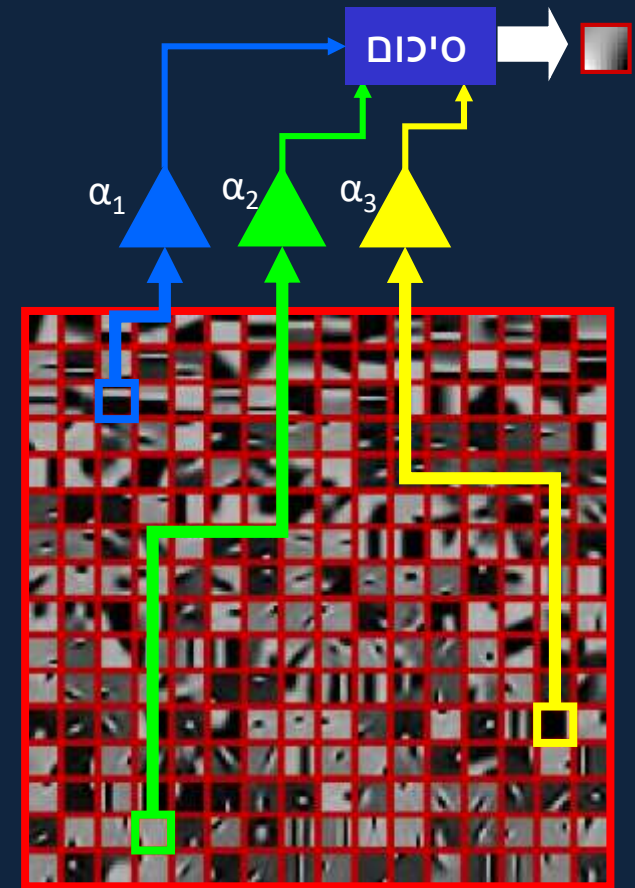
בעיות במודל ופתרון

בעיה 1: כיצד מפרקים פיסת תמונה
לאטומים הבונים אותה?

בעיה 2: מהיכן הקובל המילון?

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

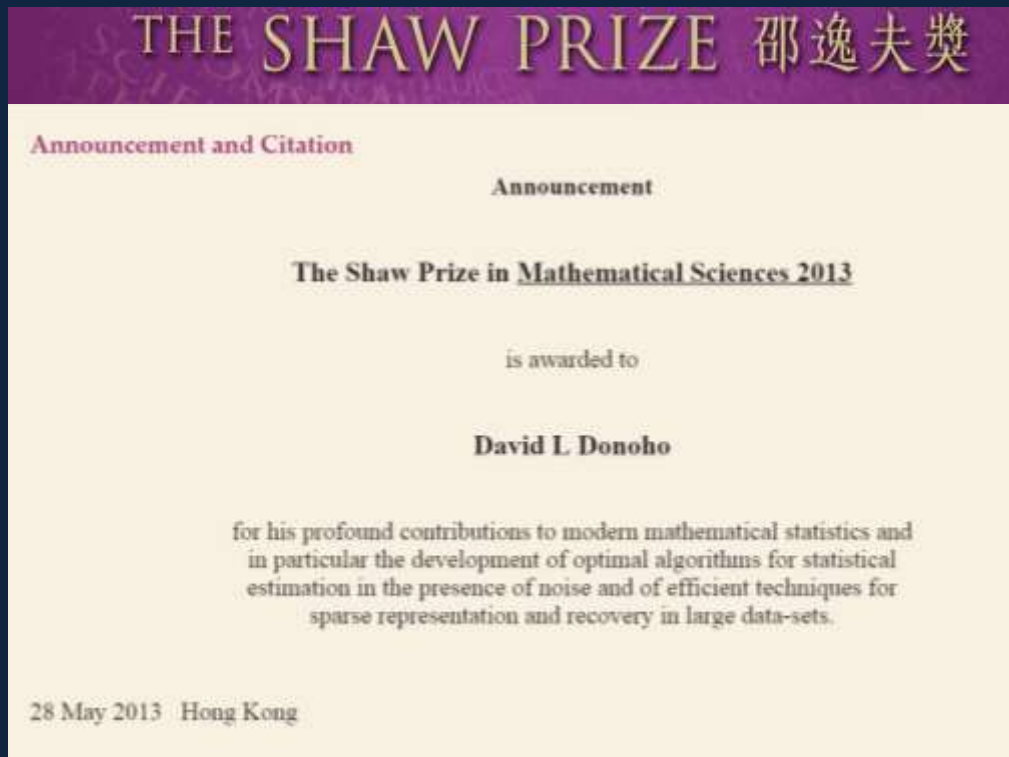


□ דויד דונוהו הוא אחד המתמטיקאים והסטטיסטיקאים המובילים בעולם. הוא פועל מאוניברסיטת סטנפורד בארה"ב.

□ 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.

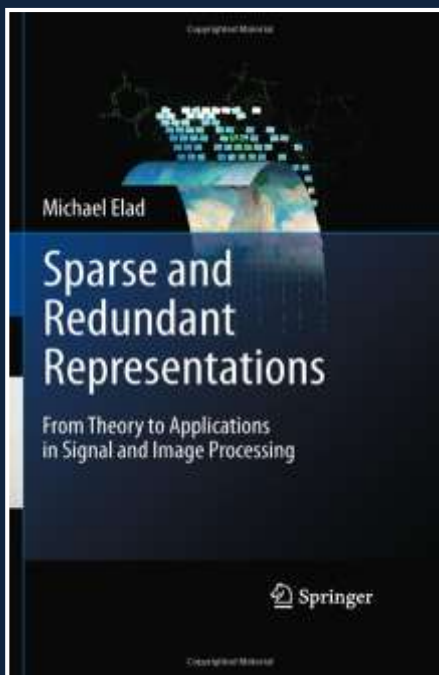


ספרים בתחום

□ 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.



קורס MOOC חדש

country	count
United States of America	325
India	178
Israel	148
UNKNOWN	101
Germany	68
Canada	61
United Kingdom	59
China	49
France	40
Russia	35
Turkey	32
Brazil	27
Spain	25
Australia	23
Greece	22
Romania	22
Japan	21
Mexico	21
Pakistan	21
Poland	21
Italy	19
Taiwan	19
Singapore	18

□ ב- 2017 בנינו (יחד עם דר' יניב רומנו) קורס ייחודי להצגת תחום זה – התיאוריה והמעשה.
 □ ניתן ללמוד קורס זה בטכניון (3 נק' אקדמיות).

The screenshot shows the MOOC website interface. At the top, there's a navigation bar with links for 'Schools & Partners', 'About', a search bar, and 'Sign In' / 'Register' buttons. The main banner features a video player with a play button and the title 'Sparse Representations in Signal and Image Processing'. Below the banner, there's a section titled 'Courses in the Professional Certificate Program' listing two courses:

- Sparse Representations in Signal and Image Processing: Fundamentals** (Starts on October 25, 2017). Description: Learn about the field of sparse representations by understanding its fundamental theoretical and algorithmic foundations. [Enroll Now]
- Sparse Representations in Image Processing: From Theory to Practice** (Starts on February 28, 2018). Description: Learn about the deployment of the sparse representation model to signal and image processing. [Enroll Now]

At the bottom, the 'Instructors' section lists Yaniv Romano and Michael Elad with their respective profile pictures.

הורדת רעש מתמונת שול

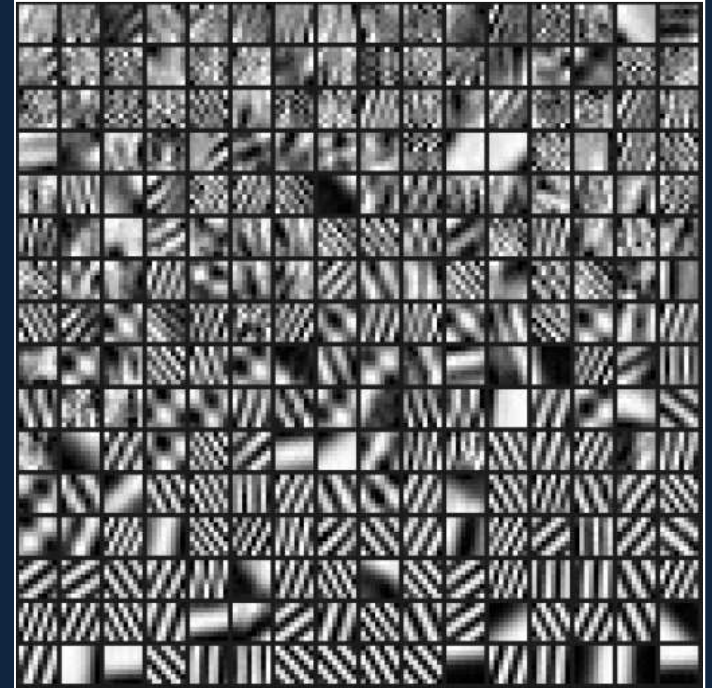
[עם מיכל אהרן, 2006]



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]



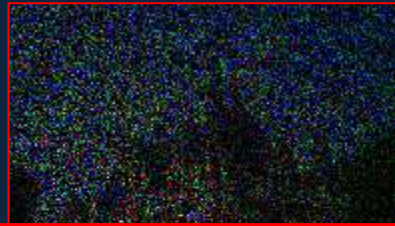
תמונת מקור



תמונה רועשת

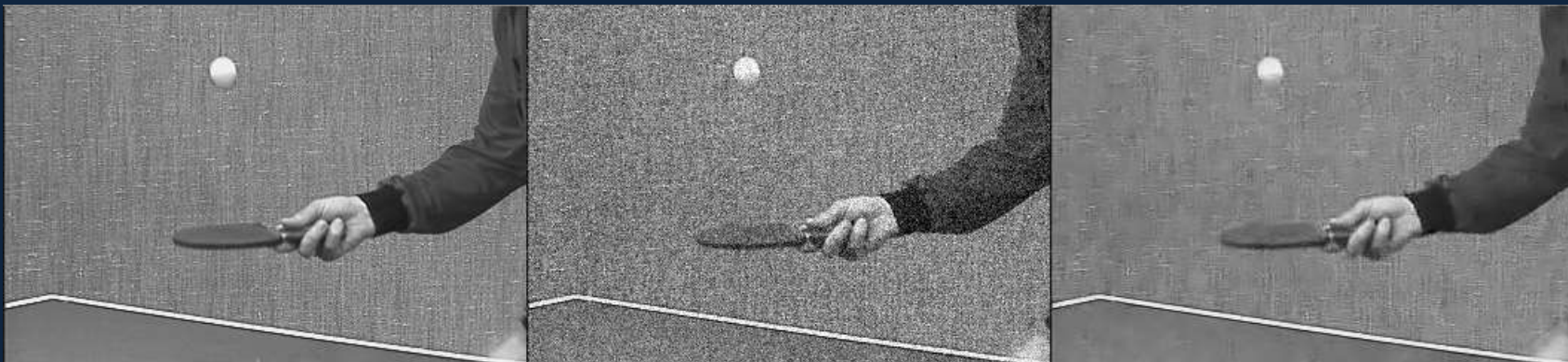
מילוי חורים

[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

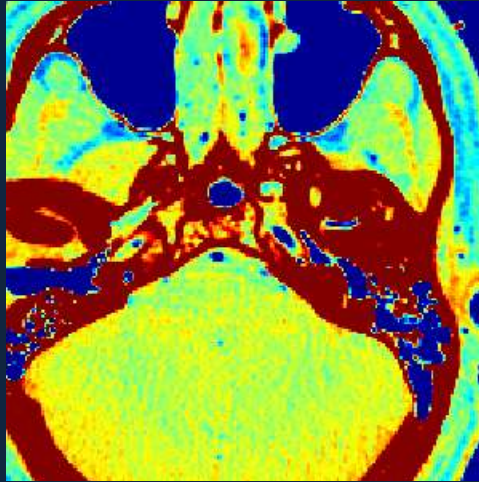


תוצאות שלנו

שחזור טומוגרפי

[עם יוסי שטוק ומיכאל צ'יבולבסקי, 2008]

תמונת מקור
של חתך המוח
בצילום CT



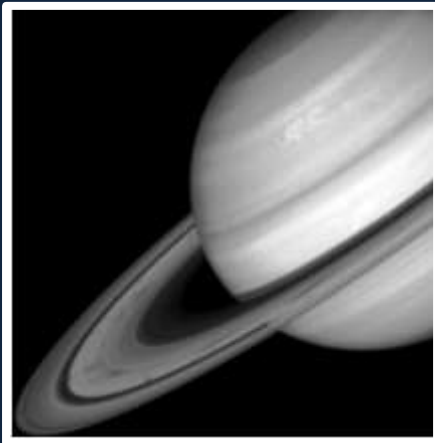
שחזור טומוגרפי
רגיל עם רמת
קרינה רגילה
במכשיר ה-CT

שחזור טומוגרפי
רגיל עם רמת
קרינה קטנה פי 5

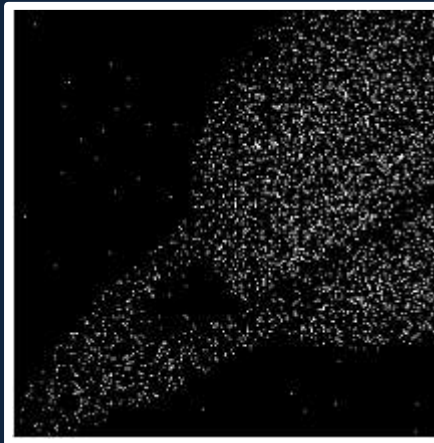
שחזור טומוגרפי
**משופר המושתת
על מודל הדלילות**
עם רמת קרינה
קטנה פי 5

ניקוי רעש פואסוני

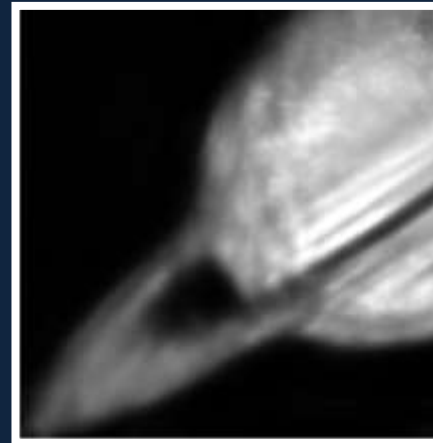
[עם רג'ה ג'יריס, 2013]



מקור



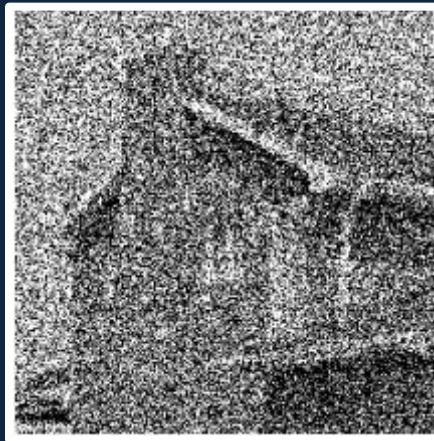
מדידה רועשת



ניקוי\שחזור



מקור



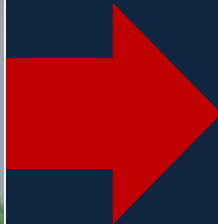
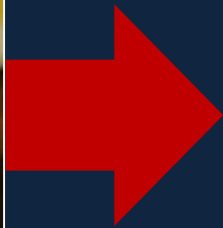
מדידה רועשת



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?

□ הטיפול בשאלה זו הוביל אותנו לתוצאה חדשה **ומרתקת** – מסתבר שמודל זה מאפשר בניית הסבר תיאורטי לתחום מרכזי שנקרא **למידה עמוקה (Deep Learning)** ואנו עובדים על נושא זה במרץ.

□ 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, אמזון, גוגל, אלביט-אלאופ, Mobileye ואינטל, 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