

לקבע את הדמות: על הכימיה שבסרט הצילום והאלקטרוניקה שבתוך המצלמה

ד"ר אמיר בן-שלום, מוזיאון המדע על שם בלומפילד, ירושלים



במאמר "מלשכה אפלה עד מצלמות דיגיטליות", ("תהודה" כרך 27 חוברת 2) תיארו את המערכת האופטית של מצלמה ואת הפרמטרים הקובעים את תפקודה האופטימלי. במאמר הנוכחי נראה את השינוי המשמעותי שחל בחיישנים שעליהם נוצרת התמונה: מ"חיישן כימי" (סרט הצילום) לחיישן דיגיטלי שהעניק למצלמה הדיגיטלית את שמה.

במאמר הקודם ראינו כיצד פועלת המערכת האופטית הקולטת את האור המגיע מהעצם המצולם ומעבירה אותו ב"צורה מסודרת" ל"משטח" הצילום או כפי שקראנו לו אז: "מישור הדמות". כמו כן ראינו שבמציאות, בשונה מהמצב האידיאלי, לכל נקודה בדמות מגיע אור מאזור בעצם ולא מנקודה בודדת ולהפך - קרני אור מנקודה בעצם מגיעות לשטח בעל גודל סופי (לא נקודה) על הדמות. משמעות חוסר דיוק זה היא טשטוש מסוים בדמות, שמידתו תלויה בתכונות המערכת האופטית. מסקנה חשובה ביותר שהצגנו היא שקיימת פשרה מובנית בין כמות האור שניתן לאסוף למידת הטשטוש: ככל שננסה לאסוף יותר אור על ידי המערכת האופטית, אנו עלולים לפגוע בחדות התמונה ולכן באיכותה.

ה"פשרה" בין חדות התמונה לבין כמות האור שהמערכת האופטית מעבירה מגדירה מראש את אחת התכונות החשובות של סרט הצילום או החיישן האלקטרוני: מידת רגישותם לאור. כלומר, כמה אור נדרש כדי לגרום לשינוי כימי בסרט שאותו נוכל לראות אחר כך בתמונה המצולמת ולחילופין, מהי כמות האור המינימלית שאליה יגיב החיישן האלקטרוני. ככל שהסרט או החיישן רגישים יותר, ניתן יהיה לקבל תמונות חדות יותר גם בתנאי תאורה גרועים.

במאמר זה נעסוק ב"קביע" הדמות על חומר כימי או במערך חיישנים אלקטרו-אופטיים: סרט הצילום שהולך ונעלם מעולמנו ומטריצת ה-CCD או ה-CMOS המחליפה אותו כמעט בכל מצלמה מודרנית.

נתחיל בהגדרות של כמה מושגים הקשורים לסרט הצילום, למערך חיישנים אלקטרואופטיים ולתצוגה זו ממדיית בכלל. בין שמדובר בתמונה "קבועה" (ציוור הדפסה...) או באמצעי "פלט" אלקטרוני (מסך, מקרן וכו'). כאשר אמצעי התצוגה הוא זה המגביל את איכות התמונה, אין טעם לפתח סרט או מערך חיישנים שאיכותו תהיה גבוהה מדי. כך למשל, כושר ההפרדה (כפי שיוסבר בהמשך) של סרטי צילום שעליהם מצלמים סרטי קולנוע, חייבים להיות טובים בהרבה מאלו המשמשים במצלמות החובבים. כל פגם זעיר על לחיה של הסככת שלא יורגש כלל בתמונה בגודל גלוי, יופיע בהגדלה ענקית על מסך הקולנוע. דוגמה מוכרת יותר היא טלוויזיה המשדרת בשחור לבן, ואין כל טעם לצלם או לשדר עברה במצלמת צבע.

חדות התמונה

1. כושר הפרדה

המושג הראשון הקשור לחדות התמונה הוא כושר ההפרדה (רזולוציה בלעז) של סרט הצילום (בהמשך נתייחס גם לזו של המערכת האופטית). ההגדרה הבסיסית של כושר ההפרדה היא "היכולת להבחין בין שתי נקודות קרובות". כלומר כמה יכולות שתי נקודות להיות קרובות זו לזו בלי ש"ייראו" (לעין או לסרט הצילום או למערך החיישנים) כנקודה אחת. חשוב לשים לב שלא מדובר על גודל הנקודה המינימלי שניתן להבחין בו אלא על היכולת להבחין בין שתי נקודות קרובות. קל להבחין זאת אם חושבים

מה מקורה של הנוסחה של איירי (Airy)?

במרחק גדול מהמפתח (עדשה למשל) הזווית שבה מופיע המינימום הראשון כתוצאה מהעקיפה נתונה בקירוב על ידי:

$$\sin\theta = 1.22 \cdot \lambda / D$$

ומאחר שבקירוב טוב $\sin\theta = r/f$, כאשר r הוא רדיוס הדיסק f - f הוחק המוקד, מקבלים: $r = 1.22 \cdot \lambda / fD$

על חיישן אור בודד ה"מסתכל" על העולם. חיישן זה יכול להבחין בכל נקודת אור שעצמתה גדולה מספיק (והיום חיישנים רגישים כבר מסוגלים להגיב לכמה עשרות פוטונים...), אך אינו יכול "לדעת" כלל אם מדובר בנקודה אחת, שתיים או חמש מאות, ובוודאי לא מהו המרחק ביניהן.

כאשר מדובר במערך של חיישנים, כושר ההפרדה שלהם תלוי בגודלו של כל חיישן ובמרחק ביניהם. במקרה הפשוט שבו החיישנים צמודים זה לזה וגודלם (אורכם או חחבם לצורך העניין) שווה בערך למרחק ביניהם, מקובל להגדיר את כושר ההפרדה כמרחק שבין כל זוג חיישנים. הגדרה זו מתאימה גם למסכים כאשר במקום חיישנים מתייחסים לגודל ולמרחק שבין הפיקסלים הפיזיים שבמסך. מסכי מחשב וטלוויזיה שטוחים בנייים כיום כמטריצה של יחידות זעירות פולטות אור. יחידות אלו מכונות "פיקסלים" (PIXEL = קיצור של PICTURE ELEMENT כלומר, אלמנט המרכיב את

התמונה), כאשר התוספת "פיזיים" מבדילה אותם מהפיקסלים ה"ווירטואליים" שמהם עשויה תמונה דיגיטלית.

מושג כושר ההפרדה קיים גם כאשר משטח החישה - מערך החיישנים שעליו נוצרת התמונה, אינו מורכב מאלמנטים בידיים המסודרים בצורת מטריצה. גם בסרט צילום או תמונה המצוירת ביד דרוש מרחק מינימאלי בין שתי נקודות סמוכות כדי שנכל להבחין ביניהן.

היחידות שבהן משתמשים להגדרת כושר ההפרדה הן יחידות של צפיפות. כלומר, מספר הנקודות (או קווים) שניתן "לצופף" ביחידת אורך מוגדרת כל עוד ניתן להבחין ביניהן. מכאן הקיצורים שאנו מכירים כמו $DPI = \text{Dot Per Inch}$, $PPI = \text{Point per inch}$ ו- $LPI = \text{Line per inch}$.

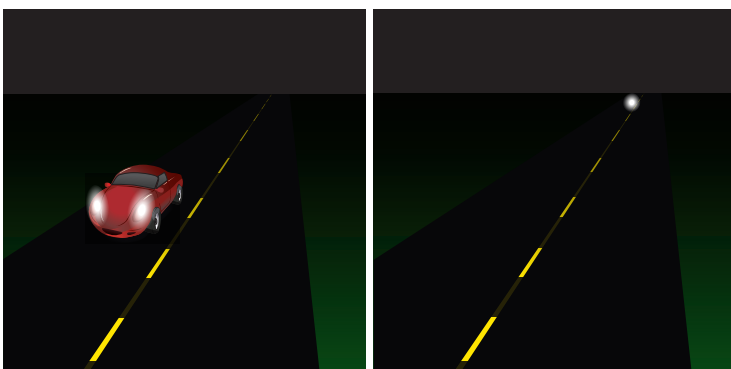
הגורמים המגבילים את כושר ההפרדה תלויים בטכנולוגיה. אם מדובר בסרט צילום, אפשר לחשוב על גודל הגרגרים הרגישים לאור; במדפסת הזרקת דיו - הגורם המגביל יכול להיות גודל טיפת הדיו, דיוק התנועה של ראש המדפסת או טיב פני השטח של הנייר. בחרו שאם הנייר מחוספס ואינו סופג את הדיו כנדרש - הנקודה המודפסת תתפשט על פני שטח גדול ו"תתחבר" לנקודות קרובות, כך שאי אפשר יהיה להבחין ביניהן.

2. כושר הפרדה זוויתי של מערכת הצילום

המושג השני הוא כושר ההפרדה הזוויתי של המערכת האופטית. כלומר, מהי הזווית הקטנה ביותר שבין שתי קרניים היוצאות מהמערכת האופטית אל שני עצמים שבהם אפשר להבחין. זהו בעצם הממד למידת הטשטוש שאותו כבר הזכרנו, הנוצרת כתוצאה מכך שאור מכמה נקודות מגיע לאותה נקודה במישור הדמות. היחידות שבהן מודדים הפרדה זוויתית הן יחידות של זווית (רדיאנים או מעלות). קיים קשר גאומטרי פשוט בין כושר ההפרדה הזוויתי של המערכת האופטית לכושר ההפרדה שניתן לקבל

על מישור העצם (או הדמות). כפי שרואים באיור 1, ככל שהעצמים שאותם אנו מצלמים קרובים יותר, הזווית ביניהם גדולה יותר וקל יותר להבחין ביניהם, ולהפך - חפצים רחוקים "מתקרבים זוויתית" זה לזה עד שכושר ההפרדה של המערכת אינו מאפשר להבחין ביניהם.

מגבלת כושר ההפרדה הזוויתי של מערכות אופטיות תלויה בגורמים רבים כמו מספר העדשות, צורתן, החומר שממנו הן עשויות, דיוק הליטוש וטיב פני השטח שלהן. אך גם במערכת עדשות אינדיאלית קיימת מגבלה פיזיקאלית בסיסית הקשורה להתנהגות הגלית של



איור 1: פנסייה של מכנית מרחוק ומקרב (לחץ על התמונה להדמיה)

האור ולתופעת העקיפה המתרחשת כאשר הוא עובר דרך פתח בגודל סופי (קוטר העדשה במקרה זה). העדשה משמשת כ"חור" ולכן בעצם, עקב תופעת העקיפה, מכל נקודה נוצר כתם (המכונה "הדיסק של איירי") שרדיוסו נתון על ידי: $f \cdot \lambda / D$. כאשר λ הוא אורך הגל, f הוא רוחק המוקד של העדשה ו- D קוטרו של מפתח האור. בהנחה שסרט הצילום נמצא במרחק המוקד (f) מהעדשה, משמעותו של הדיסק של איירי הוא שכושר ההפרדה הזוויתי של המערכת האופטית הוא כ- $1.22 \cdot \lambda / D$.

אם נניח שאורך הגל של האור הנראה הוא בערך 0.5 מיקרון, נקבל שלעדשה בקוטר 5 ס"מ (כפי שהיו למצלמות ישנות וגדולות) כושר ההפרדה המרבי ברדיאנים הוא כ-2.5 שניות של קשת. בעוד שלעדשות בקוטר של 2 מ"מ - כמו זו של מצלמה בטלפון סלולארי - יש כושר הפרדה של כ-63 שניות של קשת.

רגישות, ניגודיות ותחום דינאמי

מושג נוסף המשותף לכל סוגי ה"חיישנים" הוא הרגישות. כלומר, כמות האור המינימאלית הדרושה כדי ליצור תגובה הניתנת למדידה/הבחנה, ומהי עצמת התגובה הנוצרת בחיישן כאשר כמות נתונה של אור פוגעת בו. במקרה של סרט צילום, מדובר בתגובה כימית (שלאחר תהליך הפיתוח גורמת למידה מסוימת של השחרתו, כלומר לשינוי בשקיפותו). בחיישן אלקטרוני מדובר בשחרור מטענים חשמליים, בשינוי התנגדות או בכל שינוי אלקטרוני הניתן למדידה. בניגוד לכושר ההפרדה המתואר על-ידי פרמטר מספרי בודד (א נקודות לכל מילימטר), כאשר מדברים על רגישות מתייחסים ל"עקומת היענות" כמתואר בהמשך.

איור 2 מציג עקומת היענות אופיינית של סרט צילום. הציר האופקי מייצג את "כמות" האור הפוגעת בסרט הצילום, השווה לעצמת האור הפוגעת כפול זמן החשיפה (ביחידות לוקס כפול שניה). הציר האנכי מייצג את מידת ההשחרה של הסרט לאחר שעבר את כל תהליך הפיתוח (ביחידות של צפיפות אופטית). בחיישני אור אלקטרוניים, הציר האופקי מייצג את עצמת האור בלוקסים (לא בלוקס כפול שניה...), והציר האנכי מייצג את המטען החשמלי (או הזרם או המתח) המופק מהם.

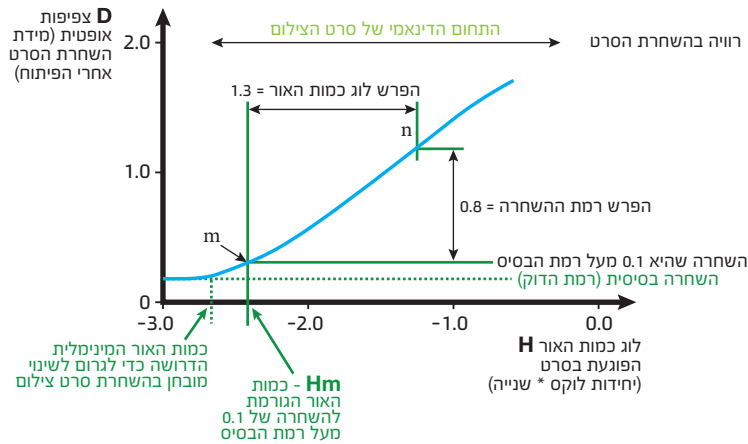
חשוב לציין שכמו בתהליכים כימיים/פיזיקליים אחרים (פלואורסציה, האפקט הפוטואלקטרי), מידת השחרת הסרט תלויה באורך הגל של האור הפוגע ובעצמת האור. תלות זו מתוכננת כך שתדמה את תגובת העין האנושית הרגישה במידה מרבית לאור ירוק ובמידה נמוכה יותר לאור כחול או אדום. גם היחידות שבהן משתמשים להגדרת עצמת האור, לוקס (Lux), הן יחידות פוטו-מטריות המביאות בחשבון רגישות זו. כך למשל, כמות הלוקסים של אור ירוק תהיה גבוהה בהרבה מזו של אור כחול או אדום באותו הספק (אנרגיית אור ליחידת זמן).

עולם לוגריתמי

כפי שראים באיור 2, הציר האופקי בעקומת היענות הוא לוגריתמי. הסיבה לכך היא שהעין האנושית, כמו מרבית החושים, פועלת בצורה לוגריתמית. כלומר, היא רגישה לשינויים יחסיים ולא מוחלטים. היכולת להבחין בין שתי עצמות אור (נניח, אור החוזר משני משטחים בגווי אפור שונים) תלויה ביחס שבין עצמות ההחזרה ולא בהפרש ביניהן. אור בעצמה 100 (היחידות אינן חשובות כרגע) יראה בהיר יותר מאור בעצמה 50, בדיוק כמו שאור בעצמה 2 נראה בהיר יותר מאור בעצמה 1. בסרגל של גוני אפור המשמש לכיול מצלמות ומכשירי מדידה, יש יחס קבוע בין כל רמת אפור לזו שלפניה. רגישות לוגריתמית זו מאפשרת לנו לראות ולהבחין בגווי האפור

מגבלות העין

המערכת האופטית הבסיסית והמוכרת לכולנו היא העין האנושית. עדשה "כדורית" אחת, צמצם ורשתית שהיא מערך החיישנים. כושר ההפרדה הזוויתי של העין האנושית הוא כדקה אחת של קשת (1/60 המעלה) בממוצע. גודל זה משתנה כמובן מאדם לאדם ותלוי בתנאי התאורה, מצב האישון וגורמים נוספים. אם ניקח את הערך הממוצע שהוזכר, הרי שמשמעותו היא שבמצב אידיאלי פנסייה של מכונת ייראו לעין האנושית כנבדלים זה מזה רק ממרחק של פחות מחמישה ק"מ. בתור תרגיל אפשר לנסות להעריך מה המרחק הגדול ביותר שממנו אפשר לקרוא עיתון או ספר. נניח שעליכם להבדיל ולהבחין בין האות ה לאות ה: כושר ההפרדה צריך להיות כעובי הקו היוצר את האות ולא כגודל האות עצמה.



איור 2: רגישות סרט הצילום

של הסרגל גם באור חלש יחסית (חדר המואר בנורה קטנה) וגם באור חזק של שמש בצהרים. עצמות האור החוזרות (וההפרשים ביניהן) שונים בכמה סדרי גודל - אך היחס (שאליו בעצם רגישה העין) נשאר זהה.

מינימום רגישות

הציר האנכי של הגרף באיור 2 מציג את מידת ההשחרה של הסרט. לכל סרט קיימת מידת השחרה מינימאלית הנקבעת על פי מידת השקיפות שלו כאשר אינו נחשף לאור כלל. רמה זו מכונה רמת הבסיס או הדוק (בלועזית, FOG מלשון אובך או ערפל), והיא תלויה בחומרים הכימיים המרכיבים את סרט הצילום, בגילו של הסרט ובתנאים שבהם נשמר. טמפרטורות גבוהות והתיישנות סרט הצילום עלולות להשחירו מעט (למעשה, להעכירו) גם ללא חשיפה לאור, ורמת הדוק תעלה. זו, אגב, הסיבה שמומלץ לשמור סרטי צילום במקרר (למי שגוד משתמש בהם...).

במקרה של חיישנים אלקטרוניים, המקבילה לרמה הבסיסית הוא המתח (או הזרם) החשמלי שמפיק החיישן בחושך מוחלט. מתח (או זרם) זה הם אקראיים בעצמתם ומהווים "רעש" אלקטרוני. רעש זה הוא ה"שלג" האחראי על הנקודות האקראיות שראים לפעמים בצילום של אזורים חשוכים במצלמה דיגיטלית. המעגלים האלקטרוניים של המצלמה מגבירים מאוד את האות מהחיישן (שעצמתו חלשה בגלל שהאזור המצולם חשוך...) וגורמים לכך שיופיעו בצורה מוגדלת כהפרעות. רעש אלקטרוני זה תלוי בגורמים רבים ובפרט בטמפרטורה. ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר, הרעש גדול יותר. במצלמות אלקטרוניות המיועדות לצילום בתנאי אור נמוכים במיוחד (מצלמה טלסקופ במצפה כוכבים, למשל), מקובל לקרר את מערך החיישנים לטמפרטורות נמוכות מאוד בעזרת חנקן נוזל או מערכת קירור אחרת.

כמות האור המינימאלית שניתן יהיה להבחין בה בצילום היא זו שתגרום להשחרה גדולה מרמת הבסיס, והיא מסומנת בנקודה m שעל הגרף, כאשר עצמת האור המתאימה לה היא H_m . ככל שסרט הצילום (או החיישן) רגיש יותר - עצמת אור זו נמוכה יותר. בסרטי הצילום המסחריים, למי שזוכר, נמדדה הרגישות ביחידות של ASA שערכו מוגדר להיות: $1 \text{ ASA} = 0.8/H_m$ כך למשל, בסרט שרגישותו 100 ASA, ערכו של H_m הוא 0.008 לוקס כפול שנייה. כלומר, פגיעת אור בעצמה של 0.008 לוקס למשך שנייה אחת (או 0.08 לוקס למשך עשירית שנייה, או 0.8 לוקס למשך מאית שנייה וכו') תגרום להשחרת הסרט ב-0.1 מעל לרמת הבסיס. בחיישנים אלקטרוניים הגדרת הרגישות מתייחסת, כאמור, לעצמת האור (לוקס) ולא לכמותו (לוקס כפול שנייה). אך מסיבות היסטוריות במצלמות דיגיטליות (בפרט במקצועיות/משוכללות) יכול המשתמש לכונן את רגישות הצילום כך שתדמה סרט בעל מידת ASA מסוימת. השינוי נעשה לא בחיישן עצמו אלא במעגלי ההגבר האלקטרוניים של המצלמה הממירים את האות מהחיישן ומעבדים אותו עד למידע הספרתי הנשמר בכרטיס הזיכרון.

מקסימום רגישות ותחום דינאמי

גורם חשוב נוסף המשפיע על איכות התמונה הוא היחס בין כמות האור המינימאלית וכמות האור המקסימאלית שניתן להבחין בהן בצילום אחד. בצדו הימני של הגרף ניתן לראות שמעל כמות אור מסוימת אין עוד שינוי ברמת ההשחרה, ולחילופין - אין עוד שינוי בעצמת האות החשמלי שמפיק החיישן. זהו אזור החוויה של הסרט או החיישן. מכיוון שניתן להקטין את כמות האור המגיעה לסרט (על ידי הקטנת הצמצם או זמן החשיפה) - אין חשיבות רבה לערך המוחלט של כמות האור הגורמת לחוויה. מה שחשוב הוא היחס שבין כמות אור זו לכמות האור המינימאלית הניתנת להבחנה. זהו **התחום הדינאמי** של סרט הצילום. כלומר, יחס כמויות האור שניתן להבחין בהן בצילום אחד. יחס זה נשמר גם כאשר משנים את גודל הצמצם או את זמן החשיפה, והוא למעשה הגורם המגביל ברוב המקרים את איכות התמונה, את עושר הפרטים המופיעים בה או את "עומק התמונה". הדבר חשוב בפרט במקרים שבהם התחום הדינאמי של העין האנושית גדול מזה של סרט הצילום. כלומר, בתמונה נראה/נבחין בפחות פרטים מאשר במציאות.

דמיינו לדוגמה צילום של נוף ביום שמש הכולל בתים עם חלונות פתוחים, אזורים מוצלים מתחת לעצים ושמים עם עננים בהירים. עצמת האור המגיעה מהשמים ומהעננים גדולה פי מאות או אלפים מזו המגיעה מהאזורים המוצלים ופי עשרות עד מאות אלפים מזו המגיעה מתוך החדרים שמעבר לחלונות. אם נניח כי התחום הדינאמי של סרט הצילום הוא רק 1:500 (שזה סרט צילום סביר), נצטרך להחליט אילו פרטים בתמונה חשובים לנו. אם נכוון את זמן החשיפה ואת גודל הצמצם כך שהאור המגיע מהשמים והעננים יהיה בתוך התחום הדינאמי, רוב הפרטים המוצלים (ובודאי אלו שמאחורי החלונות) לא ייקלטו כלל על סרט הצילום (האור המגיע מהם יהיה מתחת לסף הרגישות). אם נגדיל את זמן החשיפה והצמצם כך שהאור (החלש) המגיע מתוך החדרים ייקצא בתחום הדינאמי - האור המגיע מהשמים והעננים יהיה הרבה מעל תחום החוויה ויגרום להשחרה מקסימאלית של סרט הצילום. כך שלא נוכל להבחין בין העננים והשמים.

שינוי הצמצם וזמן החשיפה "מזיזים" את התחום הדינאמי אך לא משנים את גודלו. יחס השחרה יכול להגיע לכמה אלפים ואף עשרות אלפים בסרטי צילום איכותיים מקוריים. יש לשים לב שתהליכי שכפול והגדלה לרוב מקטינים תחום זה.

כאשר חשוב לקבל תמונה בעלת תחום דינאמי גדול במיוחד (למשל, בצילומי רנטגן או צילומי מחקר) - משתמשים בנגטיב עצמו או בסרט פוזיטיבי (למשל, סרטי שקופיות) הוּפָך לשקוף באזורים שבהם פוגע האור.

החיישנים האלקטרוניים הראשונים (שפותחו לפני עשרות שנים) היו בעלי תחום דינאמי נמוך יחסית וקטן בהרבה מאלו של סרטי הצילום. בתמונות שצולמו במצלמות דיגיטליות הראשונות קשה היה להבחין בהבדלי גוון באזורים הכהים או הבהירים של התמונה. בעיה דומה של תחום דינאמי קטן הייתה גם למסכי הטלוויזיה הראשונים. סרטי קולנוע (בפרט סרטי מתח עם הרבה סצנות חשוכות ואפלות) שהוצגו בטלוויזיה נצפו באיכות נמוכה בהרבה בגלל שבאזורים הכהים של התמונה קשה היה להבחין בפרטים. כיום החיישנים האלקטרוניים טובים בהרבה ומתחרים בתחום הדינאמי שלהם במרבית סרטי הצילום. אך עדיין תמונה דיגיטלית "סטנדרטית" תהיה בעלת תחום דינאמי נמוך מזה של סרט שקופיות.

חיישנים אלקטרוניים

רעיון החיישנים האלקטרוניים הממירים אור הפוגע בהם לאות חשמלי ידוע עוד מאז גילוי האפקט הפוטואלקטרי. חומרים המשנים את התנגדותם החשמלית כתוצאה מחשיפה לאור, כמו סלניום, היו ידועים כבר בשנת השבעים של המאה ה-19.

חיבור של חומר כזה למעגל אלקטרוני ה"מודד" את שינוי ההתנגדות החשמלית כתוצאה מפגיעה של אור, הופך אותו לחיישן אור שממנו הדרך קצרה למערכת שתתרגם את האות החשמלי ל"סימון" כלשהו: הדלקת נורה על מסך, הפעלת אלקטרו-מגנט המחובר לעיפרון המסמן נקודה על נייר וכדומה.

השימוש בחיישני אור כתחליף לסרט צילום יוצר בעיה כמותית שאינה קשורה בחיישנים עצמם אלא בחיבור החשמלי אליהם. אפילו תמונה "מנוונת מאוד" של 20x20 פיקסלים דורשת 400 חיישנים, ואילו תמונה סבירה קצת יותר של 100x100 פיקסלים -

כוללת 10,000 חיישנים וכך הלאה.

השאלה היא כיצד אפשר להתחבר לכל חיישן ו"לשאוב" ממנו את המידע על כמות האור שקלט. כלומר, כיצד למדוד את התנגדות, את המתח או את הזרם שהוא מוציא.

גם אם נצליח לחבר חוט לכל חיישן - כיצד נוכל לחבר מאות אלפי חוטים או מיליוני חוטים כאלו למעגל האלקטרוני?

הפתרון לבעיה הוא סריקה של הפיקסלים, שורה אחר שורה, פיקסל אחר פיקסל, בדומה לתהליך הסריקה של מסך השפופרת הקטודית הישנה (CRT) או העמוד המשודר במכשיר הפקס. בתהליך "סריקה" זה מועבר המידע מכל פיקסל ופיקסל בצורה סדרתית אל המעגל האלקטרוני, דרך מוליך חשמלי (חוט) בודד. מובן שיש לבצע את הסריקה והעברת המידע במהירות עצומה (בגלל המספר הגדול של הפיקסלים) ובפרט במצלמות וידיאו. אך מכיוון שמדובר בהעברת מטענים חשמליים, לרוב ניתן לעשות זאת.

חיישן ה-CCD - הזזת המטען הצדה

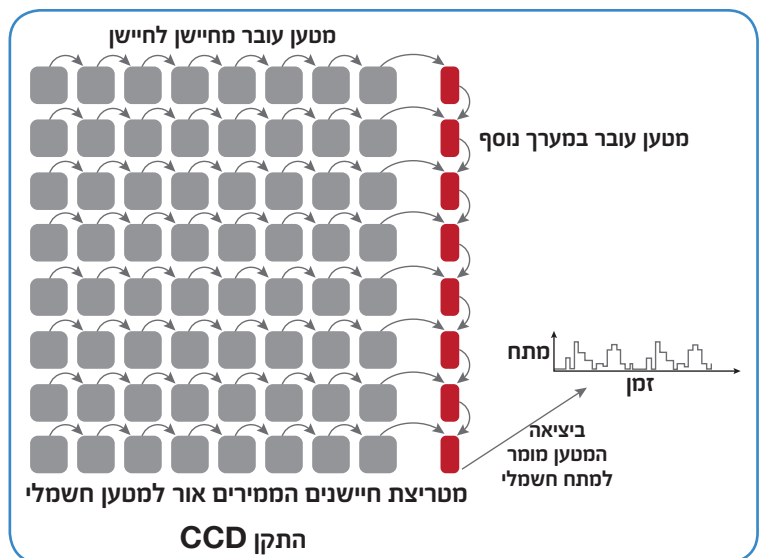
רעיון הסריקה הראשון היה מבוסס על העברת מטענים בצורה טורית (סדרתית) ממטריצה, והוא זכה לשם Charge Couple Device (בתרגום חופשי "התקן הצמדת מטען") או בקיצור CCD. ראשיתו של התקן זה היה בשנות ה-50 של המאה הקודמת, כאשר פותחו רכיבי זיכרון למחשבים האלקטרוניים הראשונים. שנים רבות אחר כך החלה חברת סוני, שזיהתה את הפוטנציאל של ההתקן בתחום הצילום, לפתח את מצלמות הטלוויזיה הראשונות בהתבסס על התקן זה.

התקן ה-CCD הוא למעשה מטריצה של חיישני אור זעירים המיוצרים על גבי פיסת סיליקון בטכנולוגיה דומה מאוד לזו המשמשת לייצור מעגלים משולבים הנמצאים כיום בכל מכשיר אלקטרוני. באורך 3 ניתן לראות מבנה סכמתי של התקן כזה. כאשר אור פוגע בחיישן כזה הוא משחרר מטען חשמלי ומעביר אותו הצדה, לאורך השורה, אל החיישן הסמוך לו. העברת המטען מחיישן לחיישן היוותה למעשה את פריצת הדרך של חוקרי מעבדות בל: סריקת אזור התמונה נעשית על ידי העברת המטען החשמלי לאורך השורה ולרחב בין שורות ההתקן, חיישן אחרי חיישן, שורה אחר שורה עד לנקודת היציאה שבה נמדד הזרם או המתח החשמלי. על פעולת החיישנים והזזת המטען שולטים בעזרת אותות חשמליים. וביתר פירוט: בשלב הראשון האור הפוגע בחיישנים משחרר מטען חשמלי. מטען זה נאגר בצמוד לחיישן במקום שאותו מכנים הפיזיקאים "בור פוטנציאלי", ואילו מהנדסי האלקטרוניקה קוראים לו קבל או אלמנט קיבולי. שתי ההגדרות נכונות, וצריך לזכור שמדובר בסך הכול במבנה גאומטרי מסוים של שכבות הסיליקון המרכיבות את החיישן.

השלב הבא לאחר החשיפה הוא מתן אותות חשמליים לבורות הפוטנציאל, כך שמטען כל בור מועבר הצדה לבור הסמוך. אפשר לדמיין את האותות כדליים המעבירים מים (מטען חשמלי) מבור לבור. המטען מהחיישנים הקיצוניים עובר למערך נוסף של בורות שממנו הוא יוצא החוצה בצורת זרם חשמלי¹.

קצב הוצאת המטענים מהמערך הנוסף צריך להיות מהיר פי כמה מזה של מעבר המטענים בתוכו. אם למשל, המטריצה מכילה 100x100 חיישנים - כל 100 המטענים שבמערך הנוסף צריכים לצאת החוצה בזה אחר זה, לפני שייכנסו 100 מטענים מהחיישנים הקיצוניים שבכל שורה.

ניתן להחזיק את החיישנים במצב שבו אינם קולטים



איור 3: אופן הפעולה של חיישן CCD.

1 | הנפשה של התהליך המתרחש בהתקן CCD תוכלו למצוא ב: http://www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html

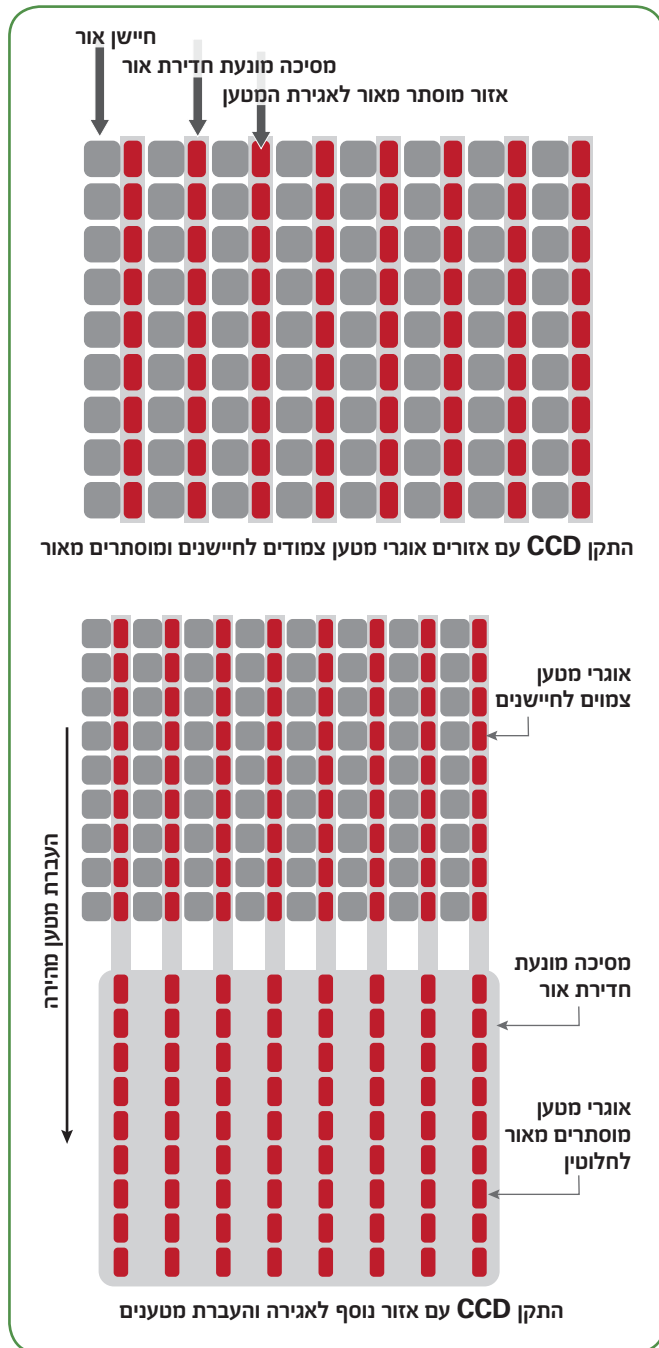
מטען כללי, ורק ברגע קבלת האות המתאים הם מתחילים לשחרר מטענים כתגובה לאור הפוגע בהם. בצורה זו ניתן לשלוט על "זמן החשיפה" בדומה לתריס המכני שבמצלמת הסרט. במצלמות המצלמות תמונה בודדת ניתן תאורטית לקצר או להאריך את זמן החשיפה כדי להתאימה לעוצמת האור. אך גם במצלמת טלוויזיה ה"מייצרת" מספר קבוע של תמונות בשנייה, ניתן לצמצם את זמן החשיפה כדי למנוע "מריחה" בצילום תנועות מהירות.

פסי אור ומריחות

למרות פשטות הרעיון, המימוש המעשי כרוך בלא מעט בעיות פיזיקאליות והנדסיות. אחת מהן היא, למשל, כיצד למנוע מהחיישן החשוף לאור להמשיך ולייצר מטען בזמן ההעברה. מטען כזה יגרום לפסים ו"למריחה" של התמונה (Blooming), מאחר שלמטען החשמלי אין "היסטוריה" ואין כל אפשרות לדעת אם מטען הנמצא למשל בנקודה 3,3 נוצר כתוצאה מאור שפגע בחיישן הצמוד אליו בשלב החשיפה, או שהוא מטען שהגיע מחיישן 2,3 ומועבר הלאה לתחנה 4,3.

במצלמת ה-CCD הראשונה הפתוח ניתן על ידי תריס מכני שנפתח לצורך חשיפת אור לזמן קצר ונסגר מיד אחר כך. אך תריס מכני מסוג זה וסינכרונו עם המערך האלקטרוני סרבול מאוד את המצלמה. תאורטית ניתן פשוט לבצע את הסריקה במהירות גבוהה פי כמה מזמן החשיפה. אם למשל זמן החשיפה הוא 20 אלפיות שנייה (50 תמונות בשנייה) זמן הסריקה הוא רק אלפית שנייה, מידת הטשטוש תהיה רק 5%. אך כדי לסרוק מערך של מיליון חיישנים באלפית שנייה, יש צורך באותות חשמליים שנמשכים פחות מנגנון שנייה, ומכיוון שכל העברת מטען דורשת רצף של מספר אותות - כל אות צריך להיות קצר עוד יותר. בנוסף גם 5% טשטוש יכולים להיות בעייתיים אם מדובר בהפרעה בהירה על רקע כהה. כך למשל, פנס רחוב או מכונת בצילום לילה "יימרו" לקו בזהב לכל גובה התמונה.

הדרך המעשית למנוע הפרעות כאלו היא לכסות את האזור האוגר את המטען (הקבל/בור הפוטנציאל) הצמוד לחיישן בחומר שאינו מעביר אור (מסכה). למעשה מחלקים כל אלמנט במטריצת החיישנים לשניים - חלק הקולט את האור (חיישן) וחלק האוגר את המטען (קבל). אות חשמלי בסיום ה"חשיפה" מעביר את המטען מהחיישן לקבל ה"מוצל". המטענים עוברים באזורים ה"מוצלים", וניתן להמשיך ולקלוט אור באותו הזמן ולצל את כל זמן החשיפה לצורך העברת המטענים. הבעיה היא שמכיוון ששני האזורים (הקולט החשוף והאוגר המוצל) צמודים, אור חזק מאוד מצליח לחזור לאזור המוצל ולהשפיע על התמונה. זו הסיבה שבמצלמות ישנות עדיין רואים את פסי



איור 4: חיישן CCD עם אזורים מוצלים לאגירה ולהעברה של המטען

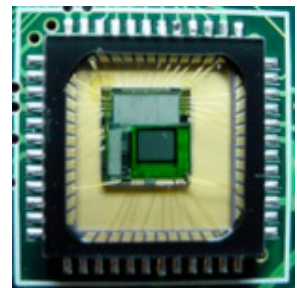
האור מעל ומתחת לפנסים. כדי להתגבר על כך, מחלקים את שטח ההתקן לשניים. על חצי אחד מייצרים את מערך החיישנים והקבלים הצמודים אליהם. ועל החצי השני מערך נוסף של קבלים המכוסים באופן כמעט הרמטי לאור. את שלב העברת המטען מחלקים לשניים. בשלב הראשון מעבירים אנכית את כל המטענים מהחיישנים לקבלים המכוסים, ובשלב השני מעבירים אותם החוצה. השלב הראשון מהיר יחסית מכיוון שמועברים בבת אחת כל המטענים משורה שלמה של חיישנים, והטשטוש הנוצר קטן.

התקני CMOS

התקן ה-CCD מיוצר אמנם על גבי פיסת סיליקון בתהליך הדומה לזה של מעגלים משולבים אחרים, אך העברת המטען בין "בורות הפוטנציאל", עד ליציאה מהרכיב, היא תהליך אנלוגי. כלומר, כמות המטען היא גודל רציף שיכול לקבל כל ערך שהוא בניגוד לגודל ספרתי (דיגיטלי) שיכול לקבל רק סדרה על ערכים בידיים².

בשנות ה-80 החלו יצרני הרכיבים לפתח מטרצת חיישנים המהווה תחליף להתקן ה-CCD ומיוצרת בתהליך CMOS סטנדרטי. בהתקן זה המרת עודף המטען לאות חשמלי והפיכתו לאות ספרתי נעשית בתוך הרכיב עצמו על ידי רכיבים אלקטרוניים רבים נוספים המיוצרים על אותה פיסת סיליקון וצמודים לחיישנים, כלומר, לאזורים הרגישים לאור והמגיבים לו על ידי שחרור מטען ויצירת זרם חשמלי.

האות הספרתי שמוציא רכיב ה-CMOS מקודד לפורמט ספרתי תקני כמו RGB, וכך ניתן לחבר את הרכיב ישירות למיקרו-מעבד או לרכיב תיאום פשוט וממנו ישירות למחשב הביתי. לא במקרה כמעט כל המצלמות הדיגיטליות הזולות ומצלמות ה-WEB מבוססות על התקן CMOS. להתקנים אלו מספר יתחנות נוספים כמו הספק נמוך יותר ואפשרות לשליטה דיגיטלית על פעולת החיישן. כך למשל, ניתן לבצע זום דיגיטלי פשוט על ידי נטרול חלק מהחיישנים וקליטת האותות החשמליים רק מהאזור המרכזי של מטרצת החיישנים.



איור 5: צילום של חיישן CMOS

מצד שני, רגישות חיישן ה-CMOS לאור נמוכה יותר. מגברים אלקטרוניים המיוצרים על ההתקן מפצים על כך, אך התוצאה היא תוספת "רעש" אלקטרוני, ולכן איכות התמונה המתקבלת (בעיקר בתאורה חלשה) היא לרוב נמוכה יותר מזו של התקן ה-CCD. זו הסיבה שבמצלמות איכותיות עדיין משתמשים בהתקן CCD ולא CMOS.

כמה מילים על צבע

בניגוד לעוצמת האור - שאותה ניתן לבטא כערך בודד בין חושך מוחלט (או העצמה הנמוכה ביותר שאליה מגיב החיישן) לבין עוצמת האור המקסימלית שמעליה כבר אין שינוי באות שמפיק החיישן - הגדרת הצבע מסובכת יותר. דרך אחת לעשות זאת היא על ידי מספר רב של דוגמאות של גוונים ותתי-גוונים, כפי שניתן לראות בקטלוגים של צבעים של חברות שונות, ולחילופין - על ידי צבעי הפנטון המהווים את הסטנדרט הגרפי המקובל. דרך אחרת היא הגדרה של מספר צבעי יסוד וקביעת היחסים ביניהם. בגלל מבנה העין האנושית, שברשתית שלה מצויים שלושה סוגי תאים הרגישים לתחומים שונים של תדירויות האור, מרחב הצבע הוא תלת ממדי: נדרשים שלושה ערכים לפחות כדי להגדיר במדויק צבע כלשהו. הצורה הנפוצה ביותר מבוססת על שימוש באדום, ירוק וכחול (RGB) כצבעי יסוד, חיבורים והגדרת כל גוון בהתאם לכמות האדום, ירוק וכחול שבו. זו השיטה שבה בנייים קובצי תמונות בפורמט בינארי (BMP) במחשב. כל מי שעובד עם תוכנות גרפיות ותוכנות עיבוד תמונה יודע שהצבע הצהוב מורכב מאדום ומירוק. צבעי יסוד אלו גם יוצרים את התמונה שעל מסך המחשב והטלוויזיה. אם תתבוננו במסך בזכוכית מגדלת, תראו שכל נקודה עשויה משלוש נקודות (או מפסים דקים) בצבעי אדום-ירוק-כחול וגם כאן, באזורים הצהובים, הנקודות האדומות והירוקות יאירו, ואילו הכחולות יהיו כביות. הסיבה לבחירה בצבעים אלו קשורה כאמור למבנה העין האנושית, ולעובדה שהחיישנים

2 | מרבית המעגלים המשולבים הם דיגיטליים, והם מייצרים בתהליך המכונה CMOS (Complementary Metal Oxide Silicon), שבתרגום חופשי פירושו: תהליך משלים הכולל מתכת וחמצן סיליקון. השם הוא היסטורי, ובהתקן שנוצר כבר אין כמעט זכר למתכת, אך הדבר חשוב הוא שהשם הפך לשם נרדף להתקן ספרתי ולא אנלוגי.

שעל הרשתית רגישים לאדום, ירוק וכחול. אך ניתן להשתמש גם בשלשה אחרת של צבעי יסוד.

השימוש בשלושה צבעים הוא רק דרך אחת להגדיר צבע, ולא תמיד הדרך המתאימה. מרבית העצמים שסביבנו אינם מייצרים אור אלא מחזירים את אור השמש או המנורה המאירה אותם, ולכן הצבע החוזר מהם לעינינו תלוי בתאורה. אם נמדוד בעזרת מכשיר מדידה את צבע הדשא (נניח, נצלם במצלמה אלקטרונית ונעביר את התמונה לתוכנת מחשב המראה את ערכי ה-RGB), נראה שהוא משתנה בהתאם לשעת היום ולכמות העננים למרות שבדשא עצמו לא חל כל שינוי. אם נבדוק את ערכי המדידה, סביר שנראה גם שהיחס בין כמות האדום לירוק ולכחול כמעט ואינו משתנה. השינוי הוא בכמות הכללת של האור. אם למשל, באור הצהריים הבהיר נמדוד ערכי RGB של (50,250,50), לפנות ערב נמדוד ערכים של (10,50,10), אך היחס 1,5,1 יישמר.

שלושה ממדים המתאימים יותר להגדרת הצבע הם עצמת האור (למשל, סך כל הצבע האדום + הירוק + הכחול) ושני יחסים בין הצבעים (למשל, הכמות היחסית של האדום והכמות היחסית של הירוק). בצורה זו ניתן להגדיר את צבע הדשא רק בעזרת שני הממדים האחרונים, כשברור שהממד הראשון ישתנה בהתאם לעצמת האור הפוגעת. הממדים היחסיים שצוינו הם רק דוגמה, וקיימות דרכים נוספות רבות לתאר את היחס שבין הצבעים השונים. בשידורי טלוויזיה, למשל, מקובל לשדר הפרשים וסכום של הצבעים השונים, אך ממד אחד הוא תמיד העצמה הכללית. מכיוון שרגישות העין היא בעיקר לצבע הירוק, החישוב המקובל לעצמת האור נותן משקל גדול יותר לצבע זה. הנוסחה המקובלת היא:

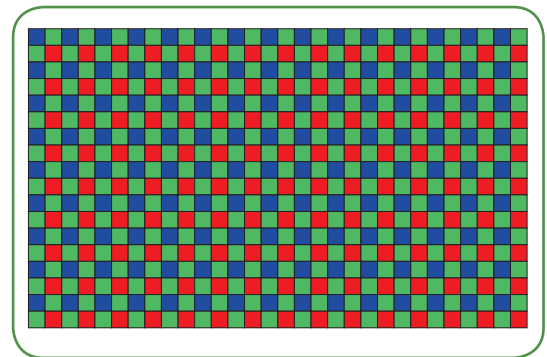
$$0.3 \text{ Red} + 0.6 \cdot \text{Green} + 0.1 \cdot \text{Blue}$$

השימוש בממדים יחסיים ולא בצבעי היסוד נעשה לא רק כדי להגדיר צבע על ידי שני מספרים ולא שלושה, אלא גם בגלל העובדה שהעין האנושית רגישה הרבה יותר לסך כל עוצמת האור מאשר להבדלי הגוון. אם למשל נדליק ונכבה נורת חשמל בקצב הולך וגובר ולחילופין נסובב גלגל פילטרים אשר ישנה את צבע האור מאדום לירוק, נראה שהעין תפסיק להבחין בשינוי הצבע הרבה לפני שתפסיק להבחין בהבהוב האור. הדבר נכון גם ביכולת להבחין בפרטים. נוכל להבחין בנקודות שחורות על רקע לבן (הבדל גדול בעצמת האור) בקלות גדולה יותר מאשר בנקודות ירוקות על רקע כחול (הבדל רק בגוון הצבע).

מסיבה זו כמעט בכל מערכת אלקטרונית המעבירה או שומרת תמונה, מקובל לתת חשיבות רבה יותר לעוצמת האור מאשר לגוון הצבע. בשידורי טלוויזיה למשל, הפרעות בקליטה יגרמו קודם כול לאיבוד הצבע ולהפיכת התמונה לשחור לבן.

בהתקני ה-CCD וה-CMOS הצבעוניים, המידע עבור הצבע אינו מוגדר לכל פיקסל ופיקסל אלא רק למספר פיקסלים שכנים. גם כאשר מציינים את כושר ההפרדה ומספר הפיקסלים, מתכוונים במקרים רבים לכושר ההפרדה בין נקודות שחורות ולבנות (הפרדה בעוצמה) ולא ליכולת להבחין בין צבעים.

מצלמות ה-CCD הצבעוניות הראשונות התבססו על שלוש מטריצות של התקני CCD. האור הנקלט בעדשה עבר דרך שתי מראות או מנסרות מיוחדות, שכל אחת מהן מחזירה אור בתחום מוגדר של אורכי גל ומעבירה את השאר. המראה הראשונה החזירה את האור האדום להתקן ה-CCD הראשון והעבירה את האור הירוק והכחול; המראה השנייה החזירה את האור הירוק ל-CCD השני, והאור הכחול המשיך ישר ל-CCD השלישי. שיטה זו משמשת עד היום במצלמות איכותיות משום שאינה מקטינה את רזולוציית התמונה. השיטה השנייה והנפוצה יותר לצילום צבעוני היא התקנת פילטרים צבעוניים זעירים ישירות על החיישנים שבהתקן ה-CCD. שיטה זו מקטינה בעצם את הרזולוציה האמתית של התמונה משום שכדי לקבל מידע שלם (גם עצמה וגם צבע), צריך יותר מפיקסל אחד של תמונה. אך סדר הפילטרים וגוניהם מתואם כך שהיכולת להבחין בעצמת האור תיפגע פחות מהיכולת להבחין בצבעים. כך לדוגמה, מסנן צבעים מקובל הוא מסנן באייר (Bayer) שבו כל פיקסל שני הוא פיקסל ירוק, ואילו הפיקסלים האדומים או הכחולים מופיעים רק כל פיקסל רביעי. הסיבה לחוסר הסימטריה היא רגישות העין לצבע הירוק שהוזכרה קודם לכן.



איור 6: חיישן באייר

קצת מספרים

כדי להעריך את המאמץ הטכנולוגי בייצור מערכי חיישנים (הן מסוג CMOS והן מסוג CCD), מעניין לחשב את הגדלים שבהם מדובר.

את גודל מערך החיישנים מגדירים כאורך האלכסון הנמדד באינצ'ים ובחלקי אינצ'ים. הדבר נעשה גם מסיבות היסטוריות (בהתאמה לקוטר שפופרות של מצלמות הטלוויזיה שאותן החליפו חיישני ה-CCD) וגם משום שהאלכסון הוא המידה הגדולה ביותר, ולכן הקריטי ביותר, להערכת העיוותים האופטיים העלולים להיגרם בשימוש בעדשה בעלת אורך מוקד וקוטר/מפתח נתון.

התקן CCD שאורך האלכסון שלו הוא חצי אינץ' (1.25 ס"מ), למשל, יהיה ברוחב של כ-10 מ"מ ובגובה של כ-7.5 מ"מ. אך השטח שבו נמצאים חיישני האור קטן יותר ושטחו כ-4.8x6.4 מ"מ בלבד. אם בתוך מלבן זה מצויים כ-400,000 פיקסלים (640x480 המתאימים לתמונה בפורמט VGA סטנדרטי), שטחו של כל אחד מהם הוא כ-10x10 מיקרון².

אך זו דוגמה להתקן מיושן יחסית (כמעט בן 10 שנים). משיקולים כלכליים, מנסים יצרני הרכיבים להקטין את גודל ההתקן ככל האפשר. הסיבה קשורה לתהליך הייצור. כמו בכל מעגל משולב, חומר הגלם הוא פרוסת סיליקון בקוטר של כ-20-30 ס"מ. על פרוסה זו מיוצרים במקביל מאות התקנים. תהליכי הייצור כוללים ציפוי, הקרנת אור דרך מסכות, איכול כימי בתמיסות, השתלת יונים ועוד תהליכים, שהמשותף להם הוא שהם מתרחשים בבת אחת על כל פרוסת הסיליקון ונמשכים זמן רב (הנמדד בימים ובשבועות). ככל ששטח ההתקן קטן, יש יותר התקנים בפרוסת הסיליקון, והיצרן מרוויח יותר.

שיקול נוסף בהקטנת שטח מערך המטענים הוא העדשה היוצרת עליו את הדמות המצולמת. ככל שהחיישן קטן יותר, ניתן להשתמש בעדשה פשוטה וזולה יותר בלי שיייווצרו עיוותים בתמונה. מצד שני, כושר ההפרדה של התמונה המצולמת נקבע לפי מספר החיישנים שבהתקן אשר הולך וגדל עם התקדמות הטכנולוגיה. כיום מקובלים מאוד חיישני CMOS בגודל של שישית אינץ' (שהשטח הפעיל בה הוא כ-1.7x2.3 מ"מ) המכילים אותו מספר פיקסלים (ואף יותר) שגודלם קטן מ-4x4 מיקרון. במצלמות דיגיטליות מקצועיות משתמשים במטריצת חיישנים גדולה יחסית (ששטחה מגיע ליותר מ-30x40 מ"מ) והמכילה 20 מיליון פיקסלים ואף יותר.

עולם הולך ונעלם

כפי שראינו, למרות שסרטי הצילום הולכים ונעלמים, תכונותיהם והפרמטרים המגדירים אותם יצרו את השפה והתקן גם לחיישנים האלקטרוניים.

ההיסטוריה של סרטי הצילום מתחילה לפני יותר מ-500 שנה עם גילוי התגובה לאור של חומרים כימיים. תגובה זו התבטאה בשינוי הגוון של החומר והפיכתו לכהה יותר. למעשה, מדובר בתהליך דומה מאוד לזה של "דהייה/הצהבה/השחרה" שראים בניירת ובחומרים פלסטיים החשופים לשמש למשך מספר ימים.

בין המאה ה-17 למאה ה-19 עסקו מאות כימאים בניסיון למצוא חומרים ותהליכים כימיים המתאימים לכך. החל מכלורידים וניטרטים של כסף יחד עם אדי כספית ויוד ששימשו לפיתוח ולקביוע התמונה לאחר שנחשפה, ועד לחומרים כמו אספלט שהתקשו לאחר חשיפה לאור, ועל ידי שטיפה במים (סוג של "פיתוח") ניתן היה לקבל תמונת תבליט.

בסוף המאה ה-19 הצליח חובב צילום אמריקני בשם ג'ורג' איסטמן לייצר סרט גמיש עשוי חומר פלסטי שאותו ניתן היה לגלגל ולהכניס למצלמה קטנה יחסית ולצלם סדרה של תמונות בלי להחליף בכל פעם לוח צילום. השימוש במצלמה ובסרט הצילום שפיתח איסטמן לא דרש השכלה אקדמית באופטיקה ובכימיה, ואת התמונות שצולמו ניתן היה למסור לפיתוח בחנות בלי להפוך את חדר האמבטיה או המטבח למעבדה כימית. איסטמן הקים את חברת קודאק ותוך פחות מעשור הפך הצילום לתחביב ומקצוע שסחף אליו אלפים רבים בכל העולם. היכולת לתעד ולרשום את המראות שהעין רואה בצורה מדויקת בלי להזדקק לאמן ובלי להיות תלוי בדרך שבה הוא רואה את הדברים, נחשבת לאחת מההפכות הטכנולוגיות של אותה תקופה.

במקביל להפיכת המצלמה למכשיר מסחרי/עממי, היא הלכה והשתכללה: רגישות הסרט לאור שופרה, וניתן היה לצלם עצמים

בתנועה או בתאורה חלשה מאוד. פותחו סרטי צילום צבעוניים וכאלו המסוגלים לצלם באור שאינו נראה לעין אנושית כמו אינפרא-אדום, אולטרה-סגול ואפילו קרני X (סרטי הרנטגן המשמשים עד היום אצל חפאי שיניים). מכיוון שהסיכויים שתשתמשו בסרטי צילום הם מזערניים, אין טעם להמשיך ולפרט, אך מעניין לציין את התכונות האופטיות של הסרטים האיכותיים באמת - אלו שעדיין משמשים במקומות מסוימים כגון הולוגרמות, צילומי רנטגן, הפקות גרפיות של פוסטרים גדולים לשילוט ועוד. אותם סרטי צילום שאיכות התמונות שניתן להפיק מהם אכן עולה (נכון לכתיבת שורות אלו...) על אלו שנצרות על ידי המצלמות הדיגיטליות.

כושר הפרדה של סרטי צילום נמדד בזוגות קווים למ"מ אורך. זוג פירושו קו שחור ליד קו לבן כך שמספר זוגות הקווים הוא בעצם מספר/צפיפות הקווים השחורים על גבי רקע לבן/שקוף שניתן להבחין בהם. מספר זוגות הקווים למילימטר של סרטים בעלי הפרדה גבוהה מגיע ל-3,000 ואף ל-4,000 זוגות. סרטים אלו מיועדים לרוב לצילומי הולוגרמות, שבהם מצלמים למעשה את תמונת ההתאבכות של האור. 4,000 קווים למ"מ - פירושה מרחק של כרבע מיקרון בין קו לקו, והוא מתאים לסדר הגודל של אורך הגל של האור הנראה ולמרחק שבין השיאים בתמונת ההתאבכות שלו. לשם השוואה, במטריצות החיישנים האלקטרוניים המשמשות במצלמות הדיגיטליות המסחריות, ואף במצלמות המקצועיות, המתקדמות ביותר - גודל החיישן הבסיסי והמרחק ממנו לחיישן השכן הם לרוב כמה מיקרונים. קיימים אמנם פיתוחים של מטריצות עם פיקסלים שגודלם חלקי מיקרון, אך מדובר בעבודות מחקר ובמטריצות עם מספר קטן יחסית של חיישנים.

בסרטים "רגילים" כושר ההפרדה נע בין כמה מאות זוגות קווים למילימטר בסרטי צילום לחובבים לבין כ-1000 זוגות בסרטים המשמשים בתחום ההעיתקות הגרפיות, אך גם כושר הפרדה זה מספיק ליצירת תמונה בעלת מספר מרשים של פיקסלים. אמנם ההשוואה לפיקסלים אינה מדויקת ביותר, אבל מספרן של הנקודות הניתנות להבחנה בתמונה הוא כ-35 מיליון - פי כמה ממספר הפיקסלים במרבית המצלמות הדיגיטליות. המצלמות המקצועיות ששימשו באולפנים הפיקו תמונות עם כמה מאות מטה (מיליוני) פיקסל. ניתן להגדיל תמונות אלו לפוסטרים ענקיים בגודל של כמה מטרים מרובעים, והפרטים בהם ייראו חדים וברורים. אגב, גם לסרטי קולנוע שנועדו להקרנה באולמות השתמשו לרוב בפילמים ברוחב של 70 מ"מ, להבדיל מסרטי החובבים שהיו ברוחב של 8 או 16 מ"מ בלבד.

אך יותר מכך, לצרכים מיוחדים (למשל, לצורך הכנת המסכות המשמשות בתעשיית המיקרו-אלקטרוניקה) ניתן לייצר בקלות יחסית "סרט צילום גדול", שגודלו נניח 30x30 ס"מ (אריח הצפה גדול) עם כושר הפרדה של 3000 זוגות קווים למילימטר. זאת משום שבסיכומו של דבר מדובר במריחה של חומר כימי, זול יחסית, על בסיס פלסטי שקוף או לוח זכוכית... מספר ה"פיקסלים" בסרט כזה יהיה כמעט 10 בחזקת 12 (מיליון מטה פיקסל)!!! פי כמה וכמה מכל חיישן אלקטרוני שיכול לעלות בדעתנו.

סיכום

אין ספק שהמצלמה הדיגיטלית ומערך החיישנים האלקטרו-אופטיים שבה דחקו כמעט לחלוטין את מצלמת הסרט מצפת האמולסיה. פרט לשימושים ייחודיים מאוד שבהם עדיין יש צורך בכושר הפרדה גבוה במיוחד ו/או במספר עצום של פיקסלים, איכות התמונה הדיגיטלית מספקת ואף למעלה מכך. גם העלות של מערך החיישנים, של המעגלים האלקטרוניים הנוספים שבמצלמה ושל כרטיסי הזיכרון שעליהם נשמרת התמונה הולכת ויורדת משנה לשנה.

כיום כבר קשה למצוא מצלמות סרט ובוודאי סרטי צילום. היתרונות של צילום דיגיטלי ברורים. ניתן לראות את התמונה המצלמת מיד, העלות של סרט הצילום נחסכת וכך גם הסיבוך הכרוך בהחלפתו. מספר התמונות שניתן לשמור בזיכרון המצלמה או בכרטיס זיכרון המותקן בה יכול להגיע למאות ואף לאלפים (בהשוואה ל-36 תמונות בסרט צילום סטנדרטי), וכמובן, ניתן בקלות להעביר את התמונות למחשב לשמירה, עיבוד שיפור/שינוי, משלוח בדואר אלקטרוני, הצגה על מסך הטלוויזיה או על תמונה דיגיטלית או הדפסה במדפסת ביתית. ייתכן גם שאם עולם האלקטרוניקה היה מקדים בכ-200 שנה, שיטת הצילום המבוססת על תהליכים פוטוכימיים לא הייתה נולדת כלל. אך כשמסתכלים על התוצר הסופי של תהליך הצילום, תמונת נף מדהימה, ציפור קפואה באוויר או סתם חיוך של ילד, כדאי לזכור שמה שחשוב אינו המצלמה והטכנולוגיה שמאחוריה, אלא היד והעין של הצלם...