



מבוא למערכות משולבות חיישנים 035033

ד"ר חאלד גומיד

הפקולטה להנדסת מכונות טל: 8292098
בניין אנרגיה חדר 407

gommed@technion.ac.il



מבוא למערכות משולבות חיישנים

1. מטרת הקורס
2. מבנה הקורס (נושאי לימוד)
3. דוגמאות
4. כללי הזהב וסיווג חיישנים
5. מערכות משולבות חיישנים: דוגמאות
6. גישה מערכתית ומפרטים
7. מפרט סטטי ומקורות שגיאה



מבוא למערכות משולבות חיישנים

מטרת הקורס

הקניית הכלים והידע הנדרשים ל-:

- **מודד/ת**: תובנה להערכת תוצאות מדידה
- **משתמש/ת**: בחירה ושימוש מושכל בחיישנים
 - קריאה והבנת מפרטים
 - קיזוז השפעות ושיפור דיוק המדידה
- **מתכנן/ת**: גישה מערכתית לתכנון מערכות מדידה
 - בחירת חיישנים ע"ס עקרון הפעולה והמפרט
- **מפתח/ת**: עקרונות בסיסיים לפיתוח חיישנים



מבוא למערכות משולבות חיישנים

1. מטרת הקורס
2. מבנה הקורס (נושאי לימוד)
3. דוגמאות
4. כללי הזהב וסיווג חיישנים
5. מערכות משולבות חיישנים: דוגמאות
6. גישה מערכתית ומפרטים
7. מפרט סטטי ומקורות שגיאה



מבנה הקורס

נושאי לימוד:

- מבוא, מושגי יסוד, ניתוח מערכות ומפרטים, הצגת תוצאות והערכת שגיאות
- השפעות סביבה, העמסה חשמלית . . .
- חיישנים התנגדותיים
- ממשקים: מעגלי גשר, מגברים, מודולציה.
- חיישנים קיבוליים
- חיישנים השראותיים
- מאפיינים דינמיים של אותות ושל מערכות מדידה
- מתמרים פייזואלקטריים
- צמד תרמי ומתמרים נוספים
- חיישנים דיגיטאליים
- מערכות מדידה ממוחשבות (דגימה)



מבוא למערכות משולבות חיישנים

1. מטרת הקורס
2. מבנה הקורס (נושאי לימוד)
3. **דוגמאות**
4. כללי הזהב וסיווג חיישנים
5. מערכות משולבות חיישנים: דוגמאות
6. גישה מערכתית ומפרטים
7. מפרט סטטי ומקורות שגיאה



דוגמאות

מדוע לערוך ניסוי? כאשר יש...

בד"כ יש להגדיר תחילה:

מה מודדים, איפה מודדים, איך מודדים . . .

כוח התנגשות בין עצמים

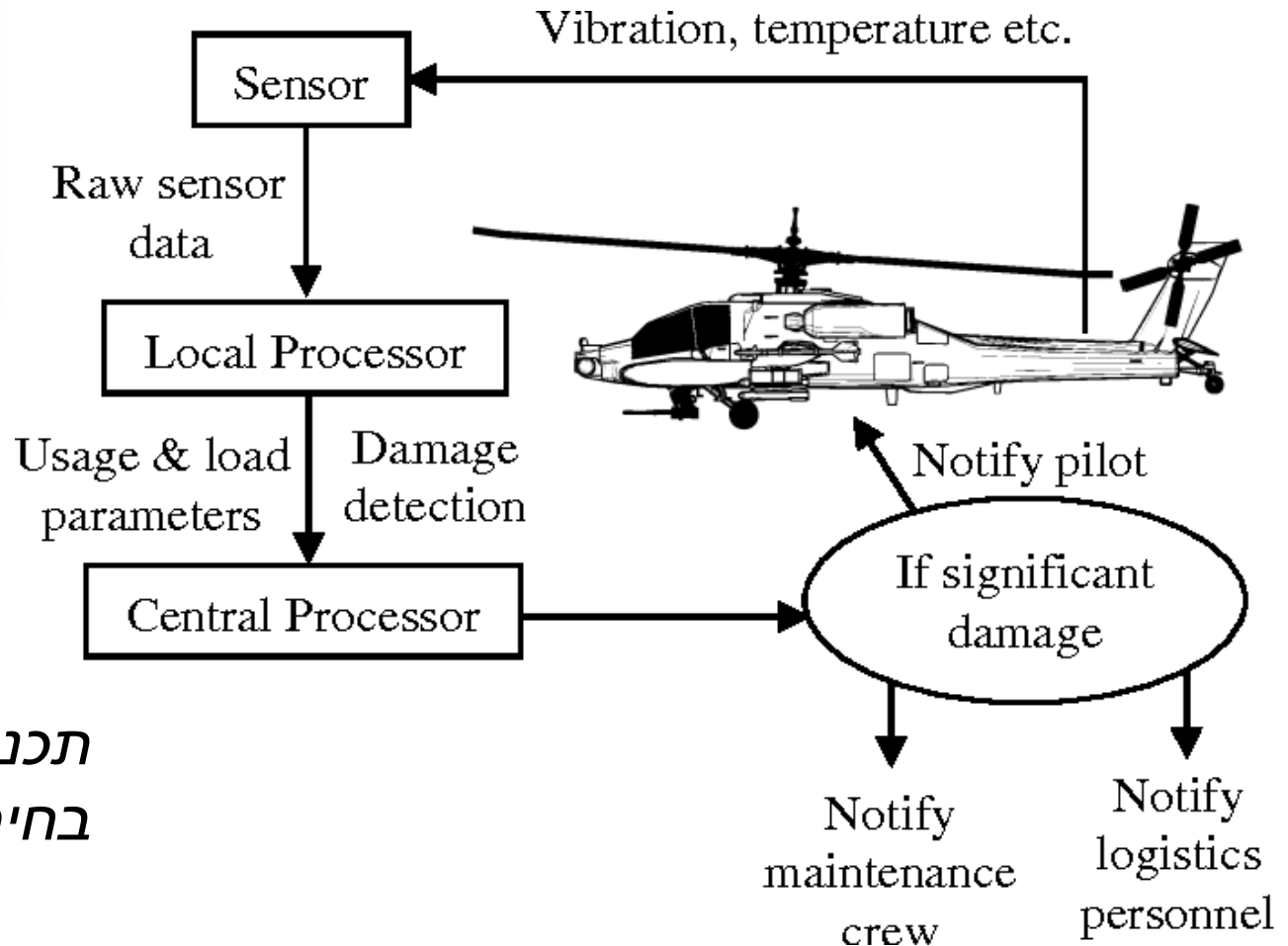
טמפרטורה של חדר

אורך של שולחן

תחומי ניסויים מגוונים ראה בהמשך ...



שימוש בחיישני תאוצה לדיאגנוסטיקה של מערכת התמסורת במסוק

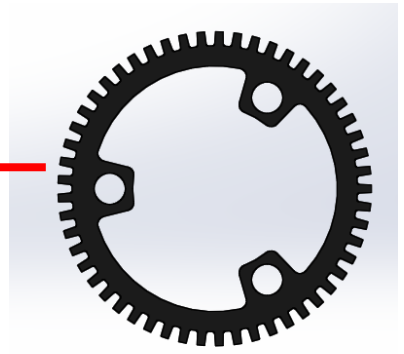
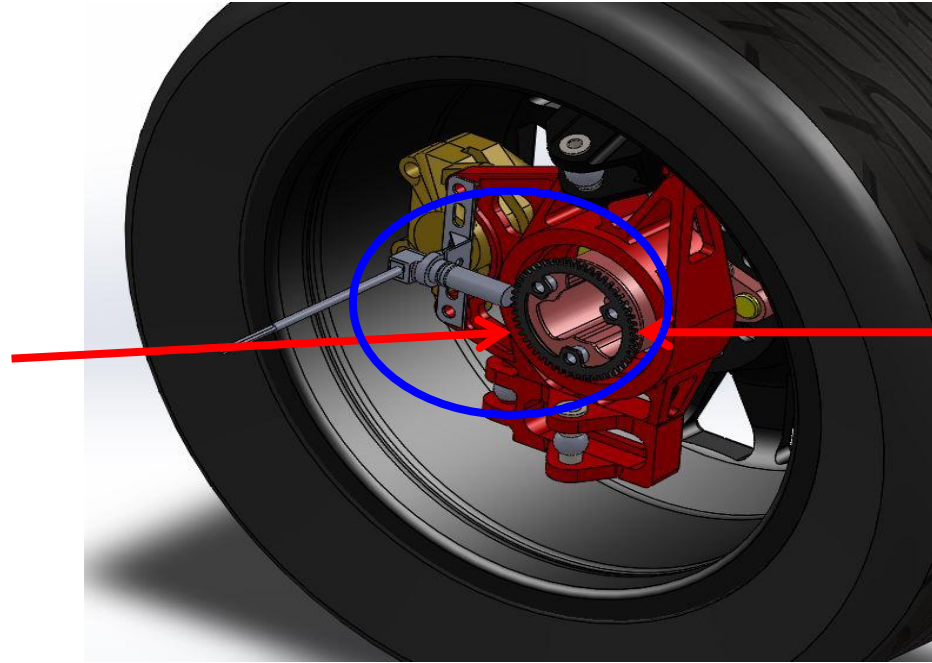
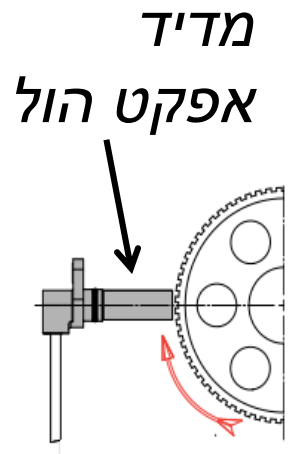


*תכנון מערכת המדידה /
בחירת חיישנים / מדידות*



חיישן סל"ד ברכב פורמולה שנבנה בטכניון

- מדיד אפקט הול וגלגל שיניים למדידת סל"ד בגלגלים – מדוע ??



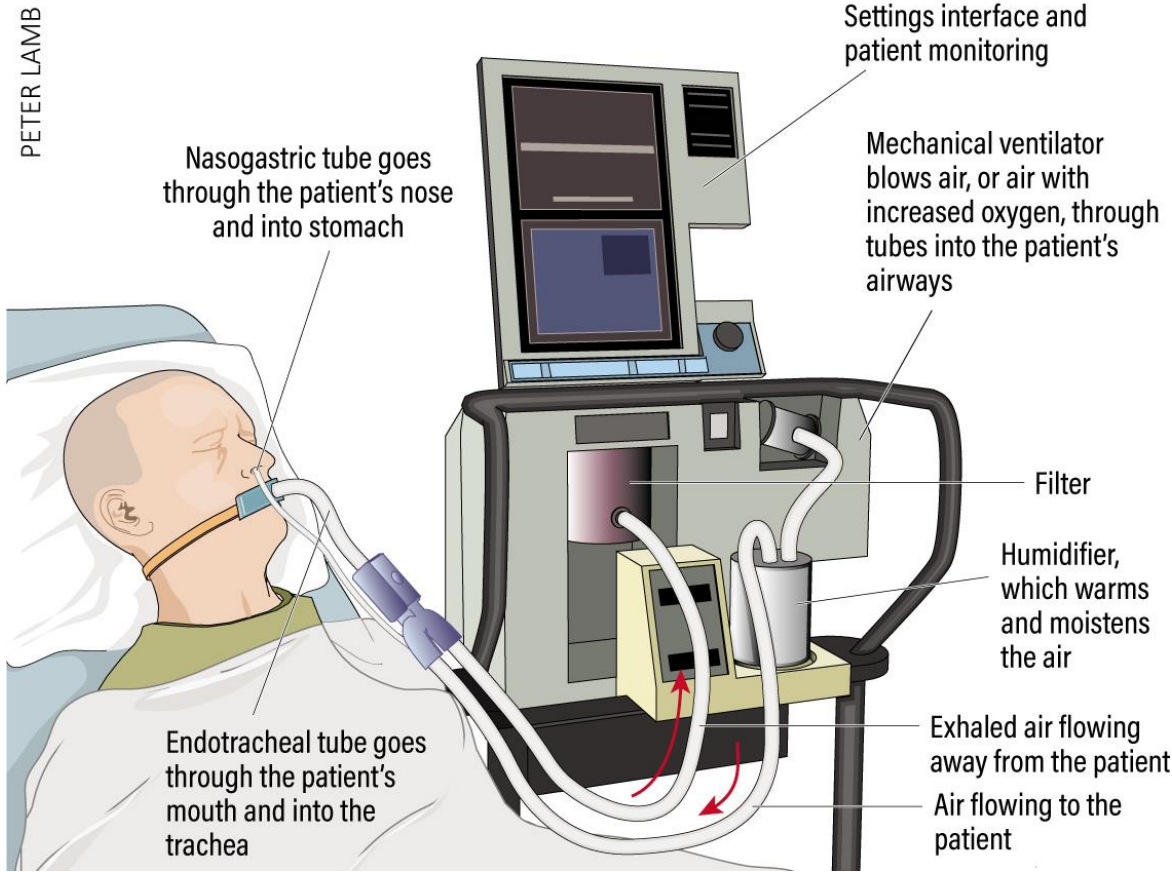


חיישנים לניטור הנשמה מלאכותית (מכנית)

Figure 1. Mechanical ventilator for positive pressure ventilation

איזה חיישנים דרושים?

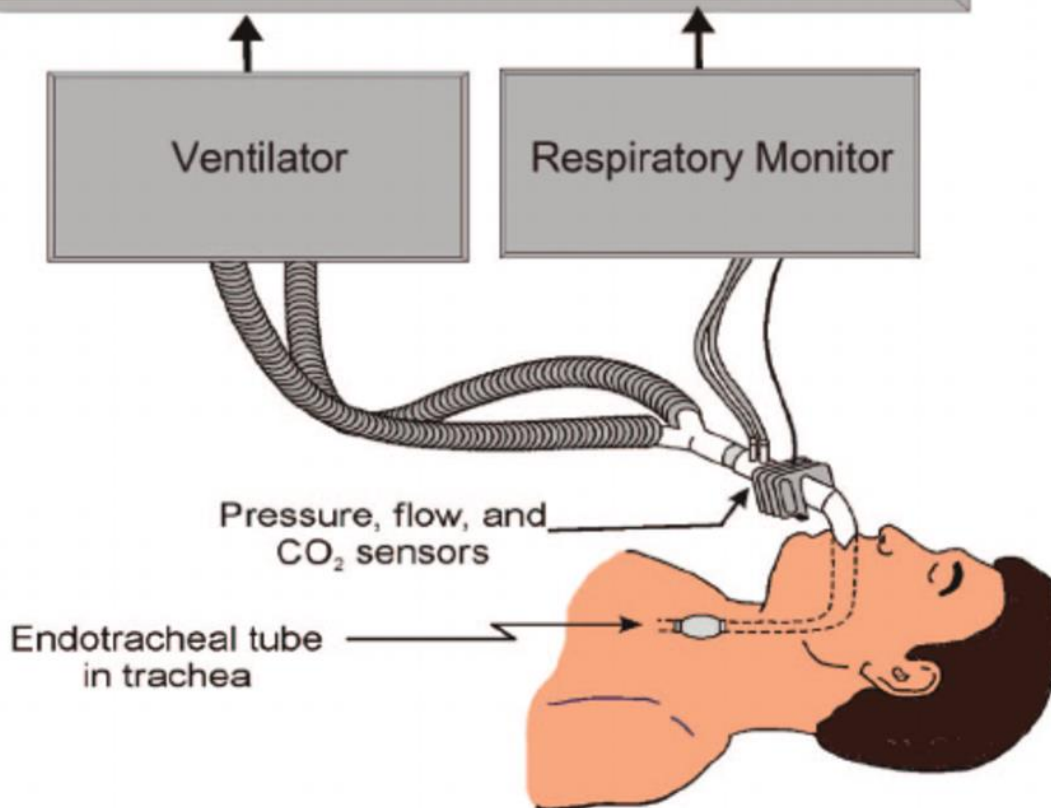
PETER LAMB



<https://derangedphysiology.com/main/cicm-primary-exam/required-reading/respiratory-system/Chapter%20509/sensors-monitoring-mechanical-ventilation>

חיישני לחץ וזרימה לניטור הנשמה מלאכותית

PSV: Pressure support ventilation
WOB: Work of breathing



These days, most pressure transducers inside mechanical ventilation equipment are of the electrical strain gauge or variable inductance type.

Variable capacitance transducers do exist, but are generally too large and bulky to be used in mechanical ventilator equipment.



מבוא למערכות משולבות חיישנים

1. מטרת הקורס
2. מבנה הקורס (נושאי לימוד)
3. דוגמאות
4. כללי הזהב וסיווג חיישנים
5. מערכות משולבות חיישנים: דוגמאות
6. גישה מערכתית ומפרטים
7. מפרט סטטי ומקורות שגיאה



מבוא למערכות משולבות חיישנים

כללי הזהב

1. כל חיישן מודד משתנים נוספים פרט למשתנה אותו הוא מתוכנן למדוד! (כמפורט במפרט, שיקול חשוב בתכן חיישנים).
2. יש עקרונות חישה שונים: אותו עקרון יכול לשמש למדידה של משתנים פיזיקאליים שונים. (דוגמא: חיישן התנגדותי יכול למדוד טמפ, תזוזה, כוח).
3. עיקרון החישה קובע תכונות רבות של החיישן – ולכן חשוב להבין ולזהות את עיקרון החישה.
4. עקרונות החישה מסווגים לארבע משפחות: חיישנים פרמטריים, מתמרים, מקודדים, וחיישני תהודה.
5. קריאת החיישן דורשת בד"כ ממשק! במערכות דגומות הממשק צריך להכין את האות לדגימה (מסנן אנטי-התחזיות).



סיווג חיישנים: קריטריונים לסיווג

❖ חיישן – שם כולל למכשור שבו מתבצע תהליך שרגיש לגודל הפיזיקלי הנמדד באופן שניתן לכימות.

❖ ניתן לסווג חיישנים לפי קריטריונים שונים:

❖ גודל נמדד: חיישני טמפרטורה, חיישני לחץ ...

❖ טכנולוגיה: חיישני MEMS

❖ שימושים: רובוטיקה, רכב, מכשור רפואי ...

❖ יציאה: חיישנים דיגיטליים או אנלוגיים ...

❖ עיקרון המדידה . . .

❖ יצירת אנרגיה . . .



סיווג חיישנים: עיקרונות מדידה

❖ אותו עיקרון מדידה יכול לשמש למדידת גדלים פיזיקליים שונים

דוגמא: חיישן פרמטרי התנגדותי למדידת טמפרטורה או עיבור.

❖ עקרונות פעולה – חיישנים אנלוגיים:

- חיישנים פרמטריים (Sensors): מבוססים על שינוי פרמטר הרגיש לגודל הפיזיקלי הנמדד

- מתמרים (Transducers): מבוססים על המרת אנרגיה

❖ עקרונות פעולה – חיישנים ספרתיים:

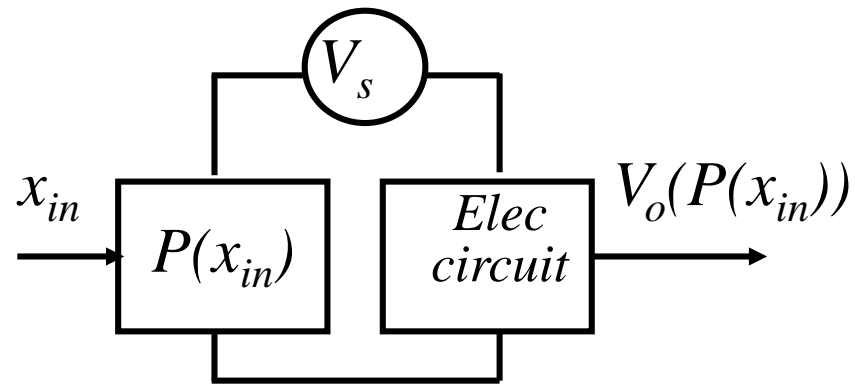
- מקודדים (Encoders)

- חיישני תהודה (Oscillators & Resonators)



סיווג חיישנים – חיישנים פרמטריים

- חיישנים פרמטריים:
 - הגודל הנמדד x_{in} משפיע על פרמטר חשמלי $P(x_{in})$ של רכיב במעגל.
 - המעגל החשמלי מעורר ע"י מתח אספקה V_s קבוע
 - מתח היציאה V_o משתנה עם גודל הפרמטר ובכך מתח היציאה משתנה עם הגודל הנמדד



דוגמא: חיישנים התנגדותיים
הפרמטר שמשתנה זה
התנגדות



סיווג חיישנים: מתמרים

- מתמרים Transducers:
 - מבוססים על התמרת אנרגיה שקשורה לגודל הנמדד (בד"כ לאנרגיה חשמלית)
 - דוגמאות:
 - חיישנים פייזו-אלקטריים: מתמירים תזוזה למטען חשמלי בחומרים פייזו-אלקטריים
 - חיישנים-אלקטרומגנטיים: מתמירים תזוזה למתח בנוכחות מגנט קבוע
 - צמד-תרמי: מתמיר הפרש טמפרטורה למתח חשמלי.



חיישנים פרמטריים מול מתמרים

• מתמרים

– רגישות נמוכה (לרוב)

$$S\left[\frac{V}{x}\right]$$

– תגובה סטטית: לא תמיד קיימת

– מבוססים על התמרת אנרגיה

• מתמרים:

– אלקטרומגטיים

– פיזואלקטריים

– תרמו-אלקטריים

– פוטו-אלקטריים

• חיישנים פרמטריים

– רגישות גבוהה (נשלטת ע"י

V_s)

$$S\left[\frac{V/x}{V_s}\right]$$

– תגובה סטטית - קיימת

– חימום עצמי, דורש חיוט

• חיישנים פרמטריים:

– התנגדותיים

– קיבוליים

– השראותיים



חיישנים פרמטריים מול מתמרים (המשך)

התמרת אנרגיה וצריכת אנרגיה

• חיישנים פרמטריים

– לא ממירים אנרגיה באופן אקטיבי

• לפיכך חיישנים "פאסיביים"

– דרוש מקור מתח חיצוני

• לפיכך יש שנקראים "אקטיביים"

• מתמרים

– מבוססים על התמרת אנרגיה אקטיבית

• לפיכך חיישנים "אקטיביים"

– לא דרוש מקור מתח חיצוני

• לפיכך יש שנקראים "פאסיביים"

חיישן פוטו-אלקטרי

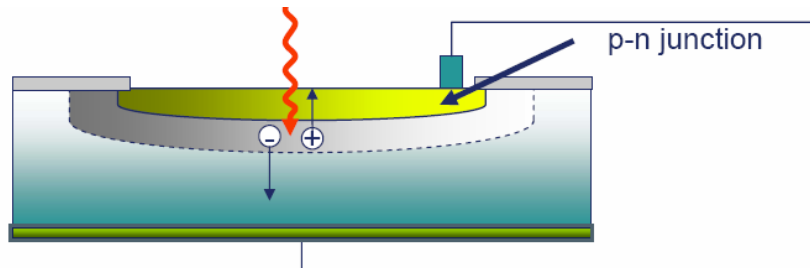
פגיעת אור גורמת לשחרור ומעבר מוליכים

חיישן פוטו-התנגדותי

עשוי מ: *Cadmium Sulfide*

שהתנגדותו יורדת עם קרינת אור

מעגל מדידה פשוט: מחלק מתח





מבוא למערכות משולבות חיישנים

1. מטרת הקורס
2. מבנה הקורס (נושאי לימוד)
3. דוגמאות
4. כללי הזהב וסיווג חיישנים
- 5. מערכות משולבות חיישנים: דוגמאות**
6. גישה מערכתית ומפרטים
7. מפרט סטטי ומקורות שגיאה



**נתחיל בדוגמאות של:
מערכות מדידה עצמאיות מופשטות**

ובהמשך דוגמאות ל-

מערכות משולבות חיישנים



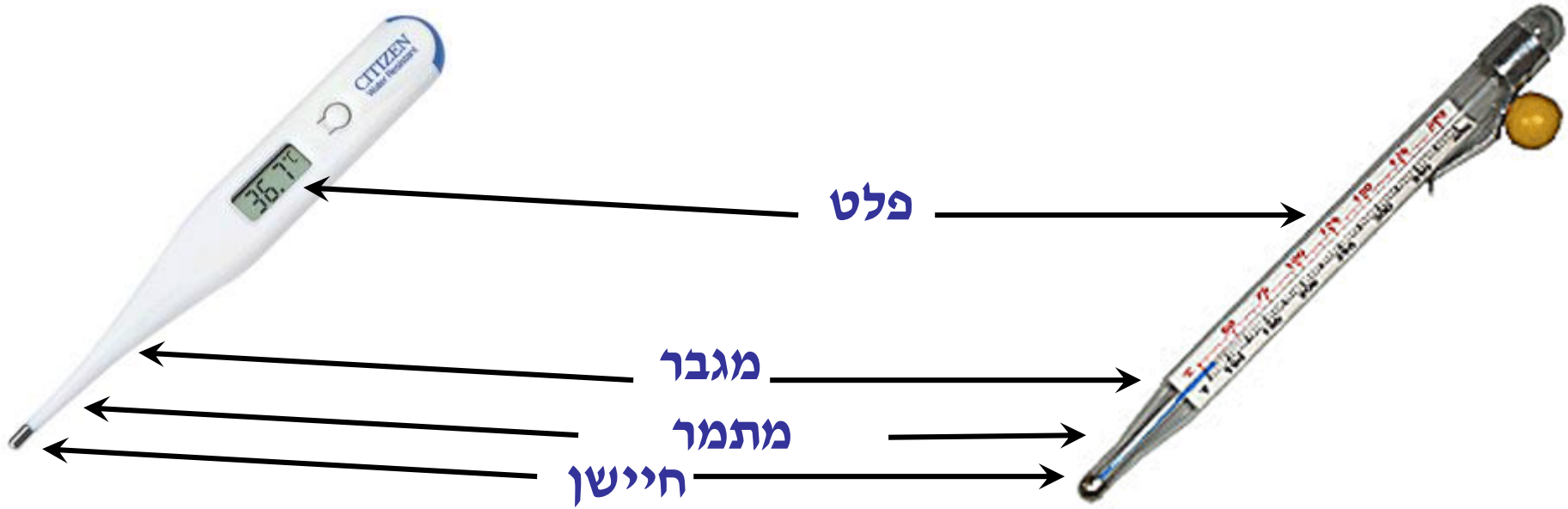
דוגמא של מערכת מדידה פשוטה

- החיישן **sensor** – שינוי טמפרטורה גורם לשינוי נפח
- התמרה – שינוי הנפח מתורגם לתזוזה
- מכשיר התאמה **signal conditioning** – שימוש בצינור קפילרי להגברת התזוזה עקב שינוי הנפח
- אין בקר/משוב **no feedback/control**
- הפלט **output** – סקאלה אנלוגית או דיגיטלית

מהו מכשיר המדידה?



דוגמא של מערכת מדידה פשוטה

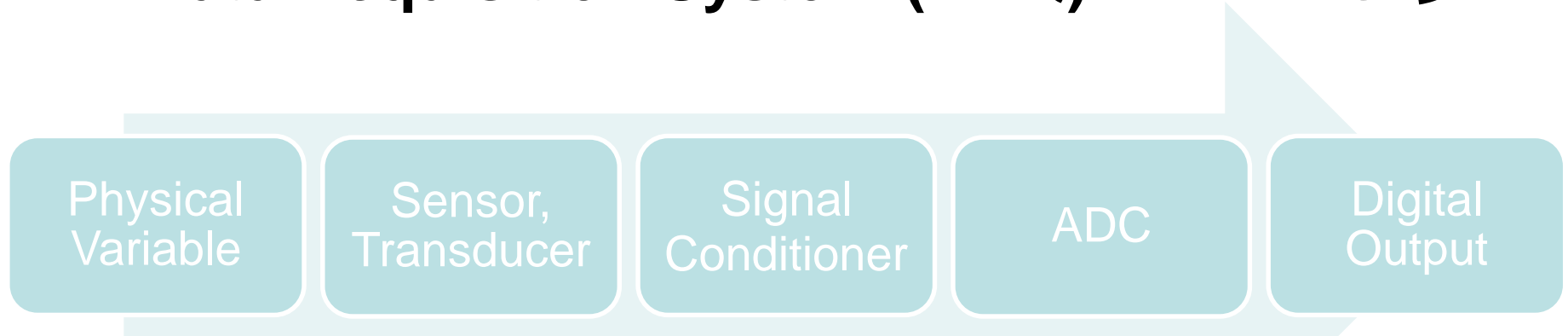




מערכות משולבות חיישנים

מערכת מדידה/ניטור עצמאית

Data Acquisition System (DAQ): מערכת מדידה:



Physical Phenomena
Displacement
Temperature
Pressure
Light
Force

Signal Conditioning:
Amplification,
Isolation,
Filtering,
Linearization

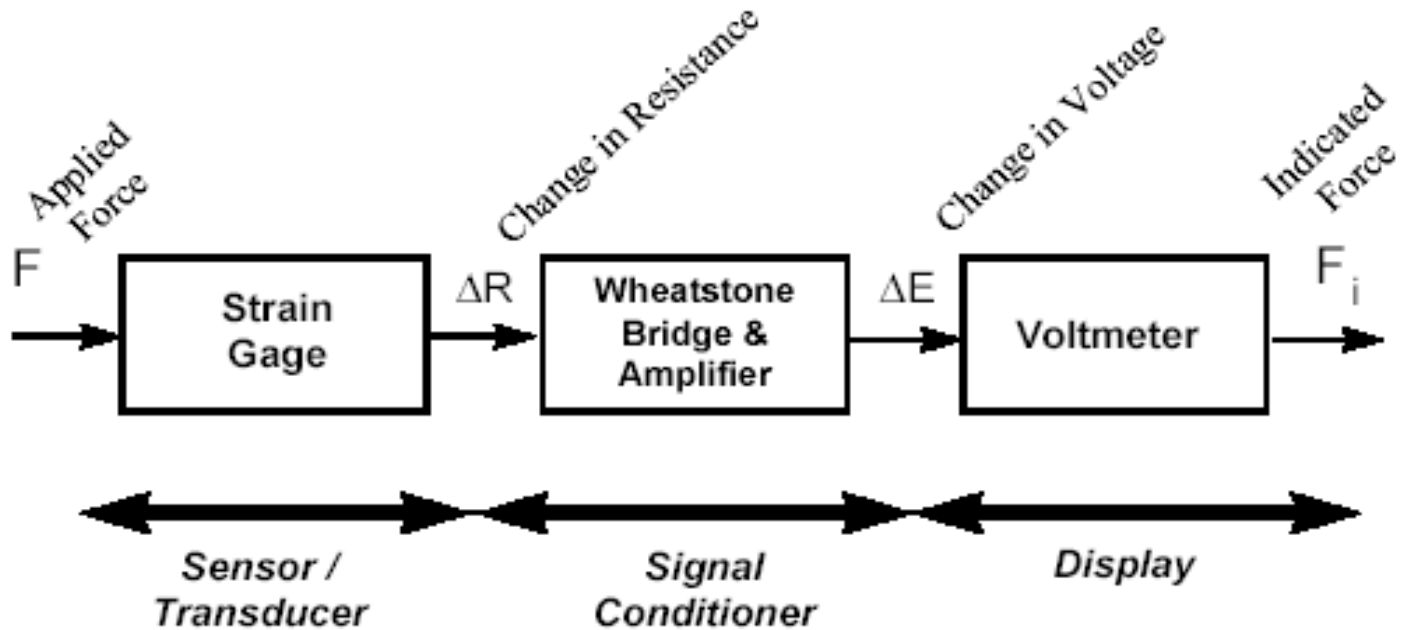
Analog to Digital (A/D) Converter:
Input signal
Sampling rate
Resolution
Range (Bit)
Gain

Digital Data:
Buffering
Structure
Length
Storage
Analysis



מידת כוח באמצעות מדי עיבור

Example of Strain Measurement System

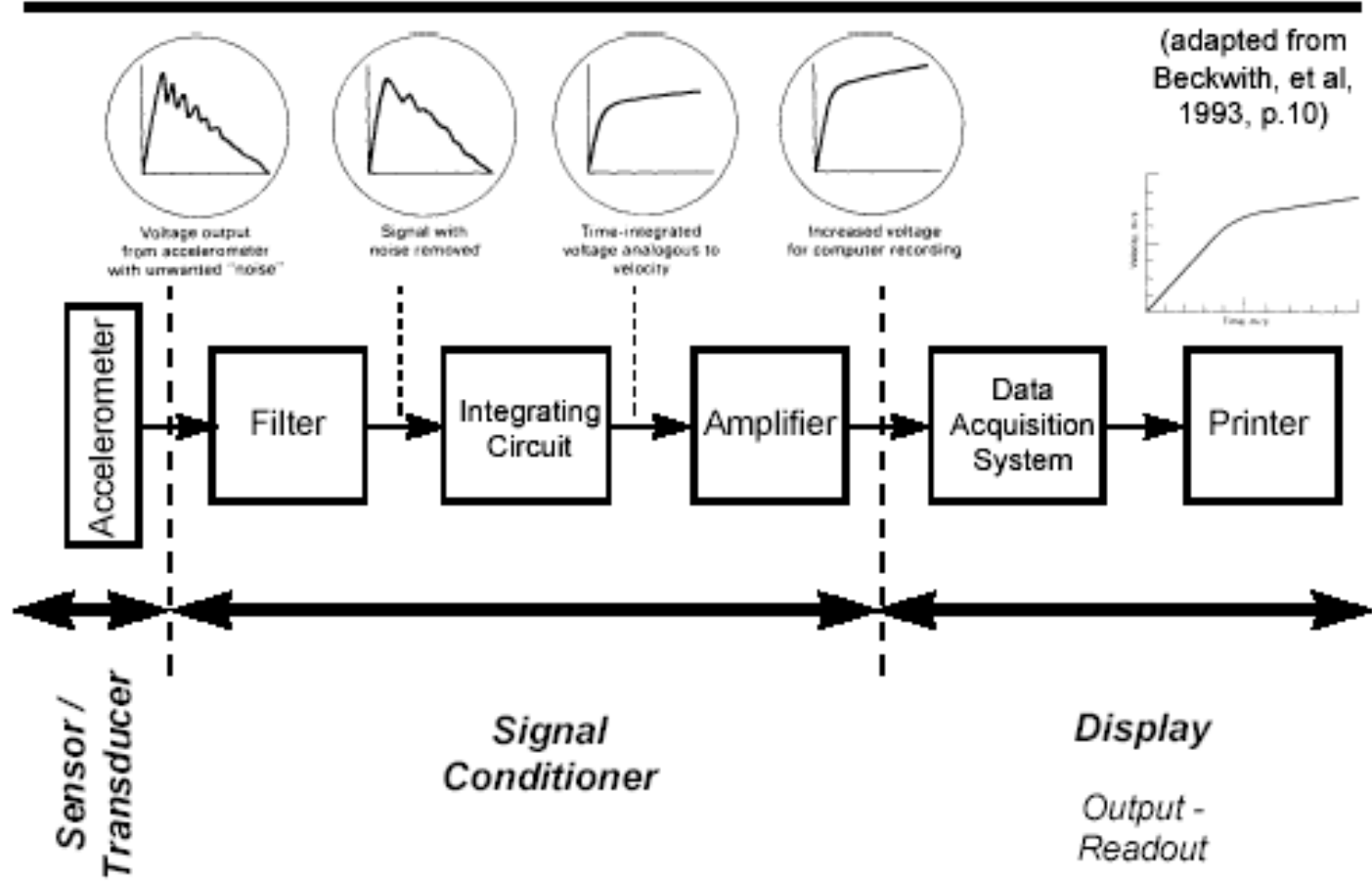


חיישן כוח מבוסס מדי עיבור: דוגמא של חיישן פרמטרי/ התנגדותי



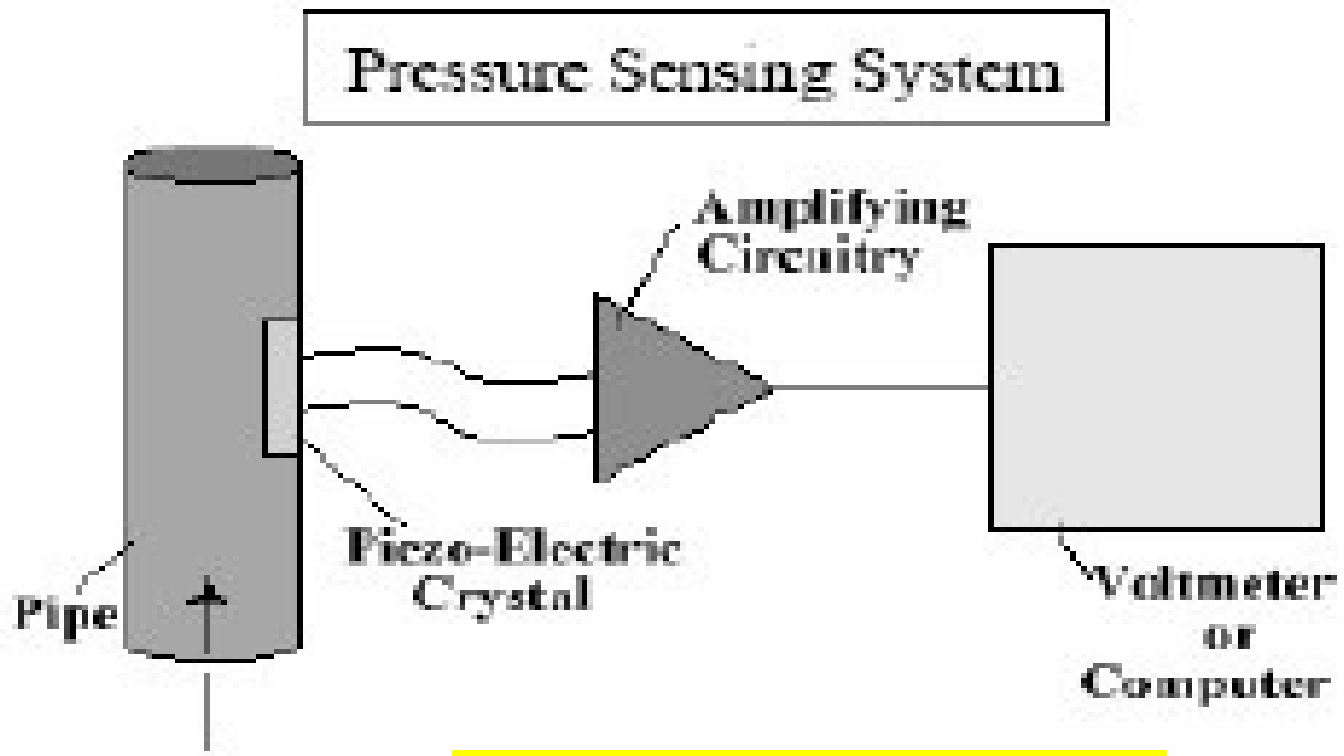
מידת מהירות באמצעות מד תאוצה

Example of Velocity Measurement System





מדידת לחץ ?



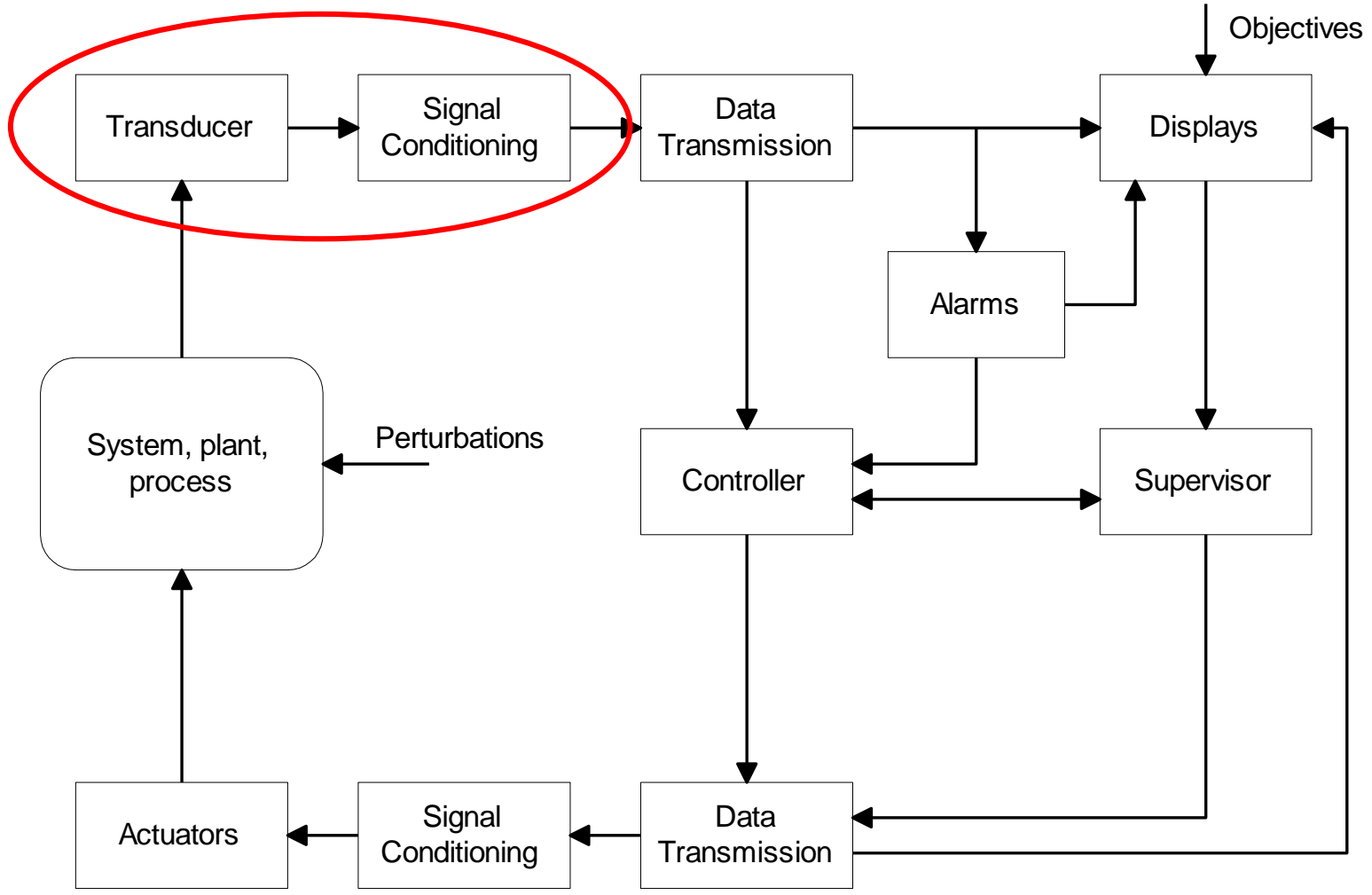
מה חדש בדוגמא זאת ?

קיים שילוב בין מערכת החישה והמערכת הפיזיקלית



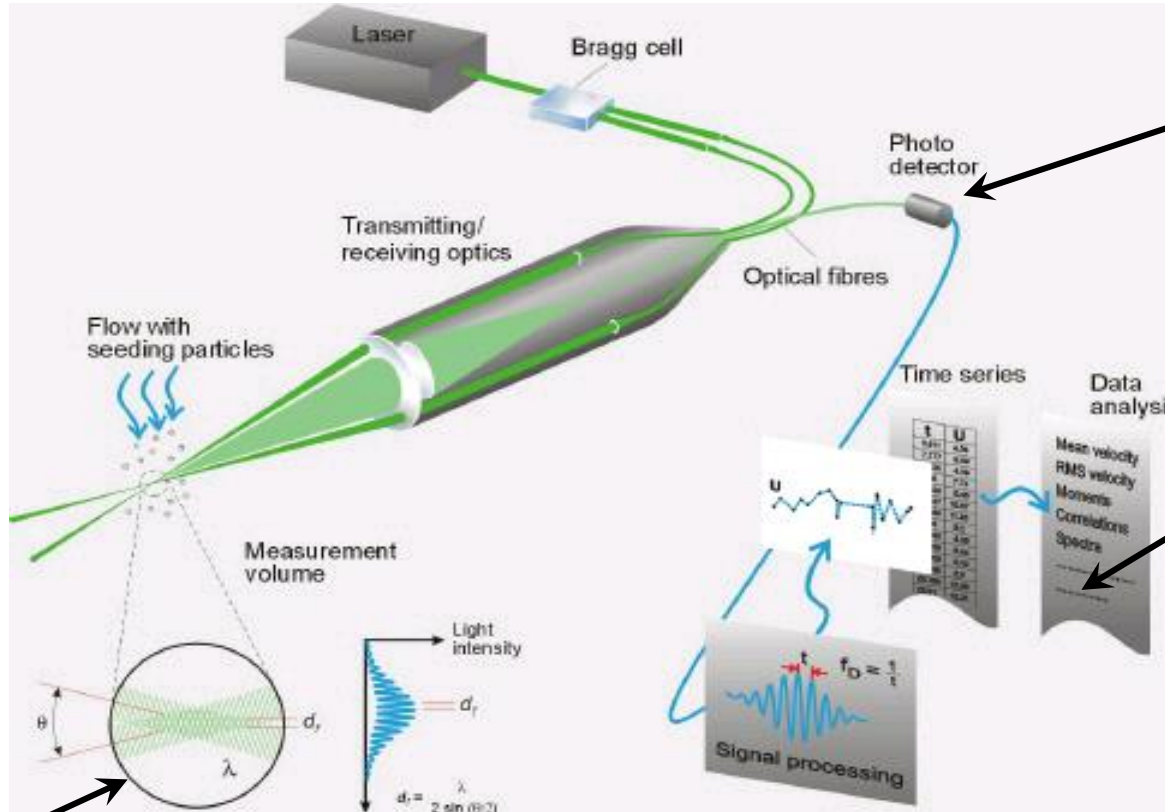
מערכות משולבות חיישנים

מערכת בקרת תהליך





מערכת מדידה LDA



הגברה והתאמה

פלט

חיישן

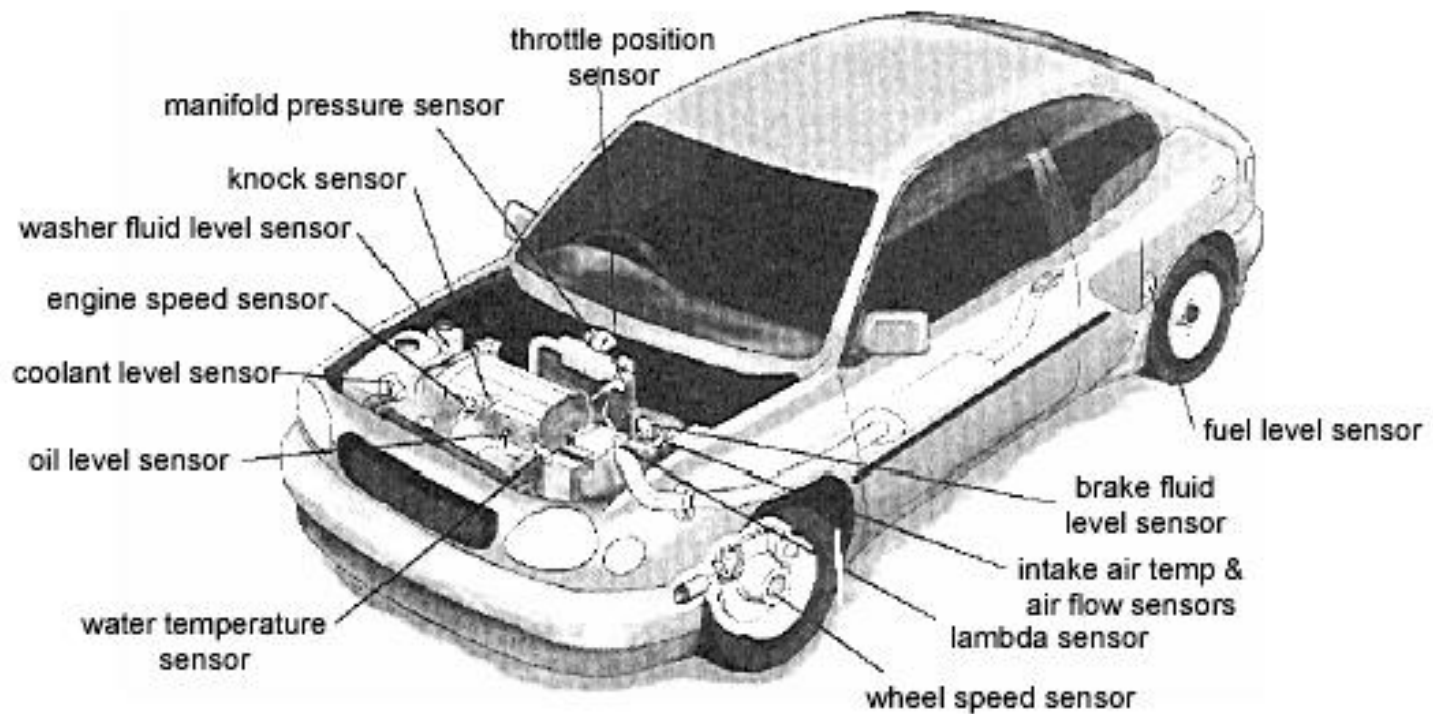
התמרה

Johann Doppler (1803-1853)



חיישנים ברכב

Sensors in Automobile



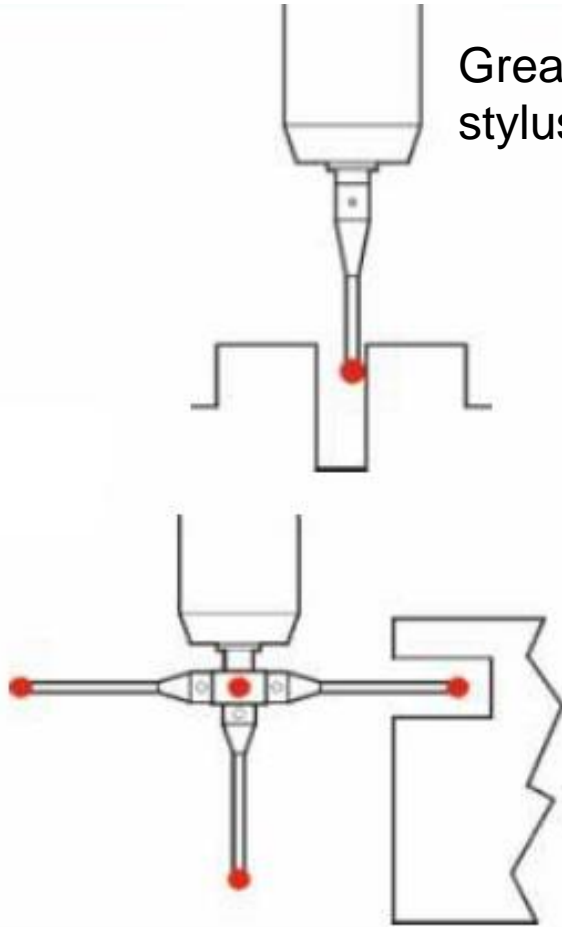
Sensors in a car measure temperature, pressure, liquid level, flow, displacement, velocity, and emissions



Machine tools sensors

CNC programmable machine movements use servo motors and high resolution scales (as low as 0.1 micron)

Great variety of probe tip diameters and stylus lengths



Low Force Contact Probe Measures Extremely Delicate Materials, Contact force as low as 1 milligram or 9.9×10^{-6} N. Tip diameters of $125 \mu\text{m}$





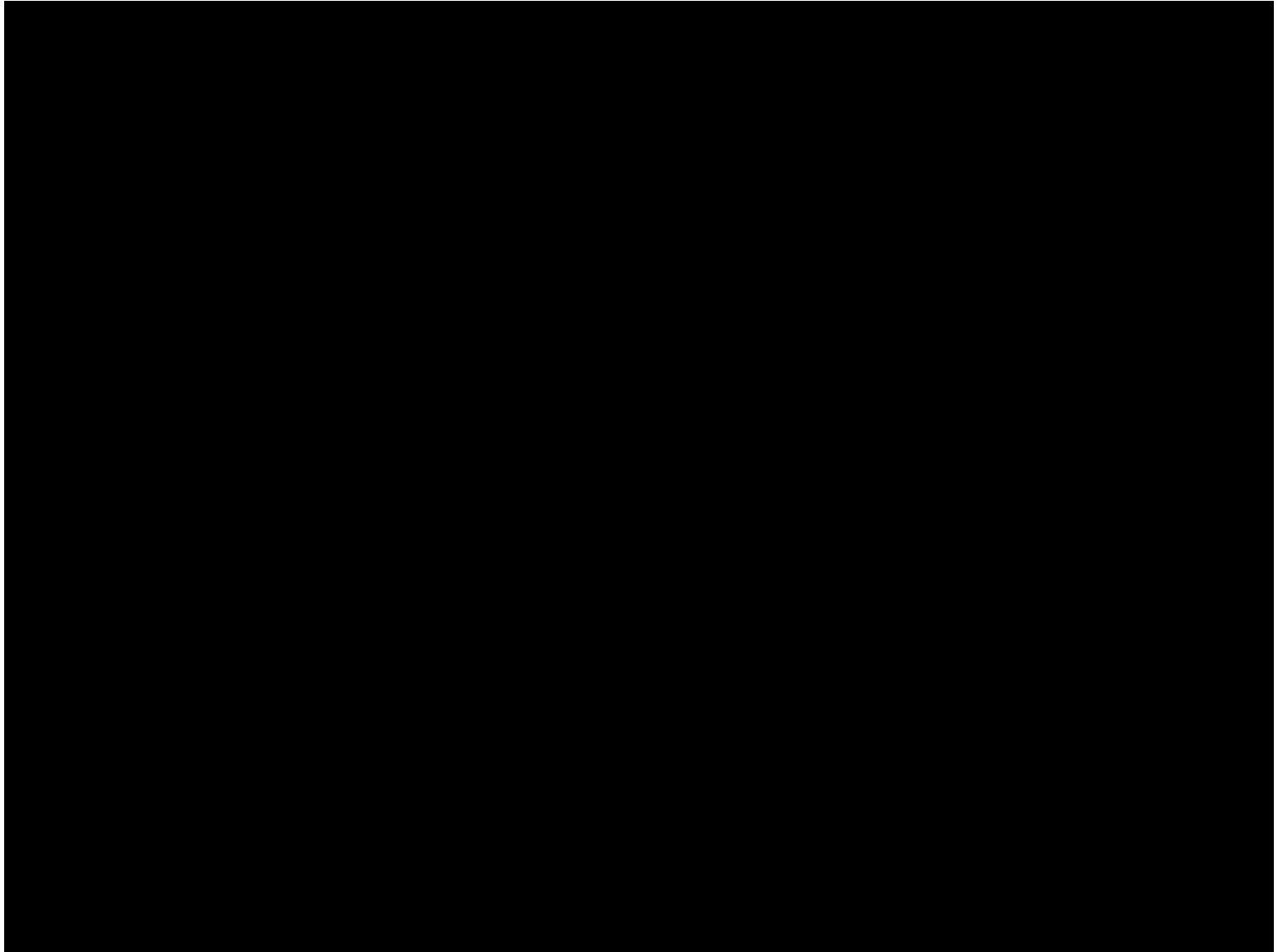
Sensors in assembly



Nachi Robotics demonstrating
automated assembly with
force-controlled feedback utilizing
ATI's Delta model
Six-Axis Force/Torque Sensor



Vibration Sensors





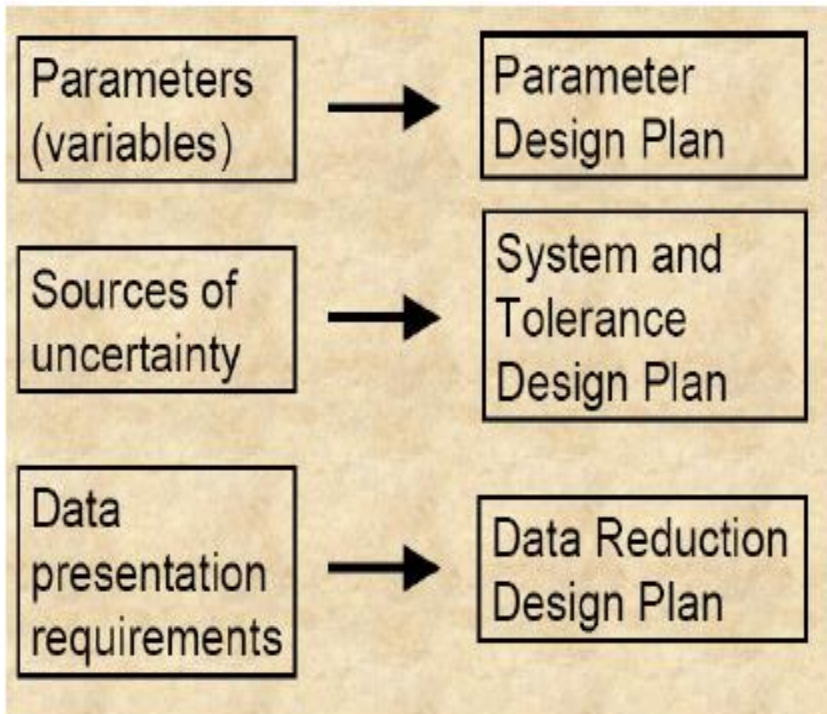
מבוא למערכות משולבות חיישנים

1. מטרת הקורס
2. מבנה הקורס (נושאי לימוד)
3. דוגמאות
4. כללי הזהב וסיווג חיישנים
5. מערכות משולבות חיישנים: דוגמאות
6. גישה מערכתית ומפרטים **(תכנית ניסוי)**
7. מפרט סטטי ומקורות שגיאה



תכנית ניסוי (שלב 0)

הגדרת שאלת (מטרת) הניסוי -
השאלה עליה הניסוי מתוכנן לענות:



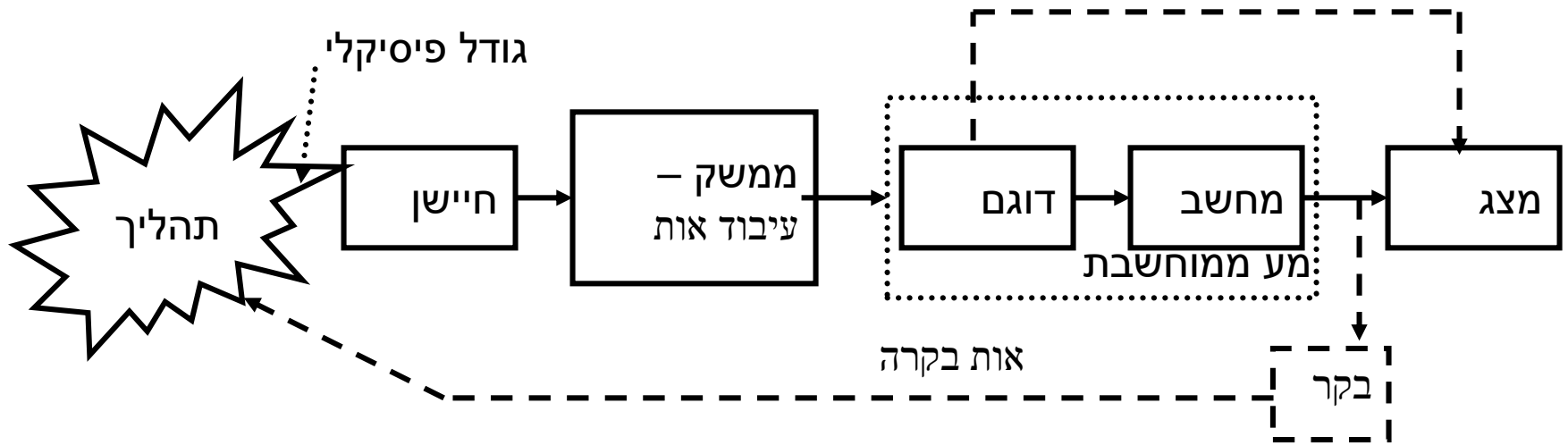
- **תכן הניסוי:** זיהוי הגדלים שיש למדוד (והמשתנים שיכולים להשפיע על התוצאה). קביעת הדיוק הדרוש.
- **תכן המערכת:** בחירת שיטת המדידה, המכשור ושיטת הניסוי שתאפשר למדוד את הגדלים הדרושים בדיוק הדרוש. לאחר זיהוי ... מקורות שגיאה.
- **תכן איסוף וניתוח המדידות:** איך יעובדו הנתונים - לצורך חישוב והצגת התוצאות כנדרש.

לדוגמה – מדידת עומס חום של חדר, או טמפרטורת חדר.



מערכת מדידה – גישה מערכתית

מבוססת על מפרטים



- מדידה – תהליך שמיחס ערך מספרי למשתנה פיסיקלי
 - מערכת המדידה מאפשרת לכמת את ערך המשתנה הפיסיקלי ומרחיבה את יכולות החושים שאינם מתאימים לכימות מספרי.

מהן תכונות מרכיבי המערכת (חיישן ...)? התאמה לתהליך? איך מתממשקים?

- מפרט – תיאור ביצועים של חלק, תת מערכת או מערכת
 - מאפשר תכנון מערכת מחלקים (תת מערכות)
 - מאפשר אנליזה וחיזוי של ביצועי המערכת



מפרט דוגמא

- מפרט דוגמא: חיישן כח
 - כללי
 - כוח [N]
 - מדי עיבור
 - מפרט סטטי
 - 0-100 N
 - 10 mV/N
 - 0.5%
 - מפרט דינמי
 - 0-1000 Hz
 - 1 msec
 - תכונות חשמליות
 - 600 Ω
 - 6V
 - תכונות מכאניות
 - 10x20x5 cm, 200gr
 - תנאי סביבה
 - 0.1%
 - -10 – 50 °C
 - 0.1 %/ °C
 - ?

- מפרט
 - כללי
 - גודל נמדד
 - עקרון המדידה
 - מפרט סטטי
 - תחום
 - רגישות
 - דיוק
 - מפרט דינמי
 - תחום דינמי ...
 - זמן תגובה
 - תכונות חשמליות
 - התנגדות עצמית
 - מתח אספקה ...
 - תכונות מכאניות
 - משקל, מידות
 - תנאי סביבה
 - רגישות ניצבת
 - טווח טמפרטורה
 - רגישות לטמפרטורה ...
 - מחיר



Base Units

Definitions of the SI units

1 Unit of length	meter	The meter is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of $1/299\,792\,458$ of a second.
2 Unit of mass	kilogram	The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram.
3 Unit of time	second	The second is the duration of $9\,192\,631\,770$ periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the cesium 133 atom.
4 Unit of electric current	ampere	The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 meter apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to 2×10^{-7} newton per meter of length.
5 Unit of thermodynamic temperature	kelvin	The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction $1/273.16$ of the thermodynamic temperature of the triple point of water.
6 Unit of amount of substance	mole	1. The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon 12; its symbol is "mol." 2. When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles.
7 Unit of luminous intensity	candela	The candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} hertz and that has a radiant intensity in that direction of $1/683$ watt per steradian.

Derived units	area	square meter	m^2
	volume	cubic meter	m^3
	speed, velocity	meter per second	m/s
	acceleration	meter per second squared	m/s^2
	wave number	reciprocal meter	m^{-1}
	mass density	kilogram per cubic meter	kg/m^3
	specific volume	cubic meter per kilogram	m^3/kg
	current density	ampere per square meter	A/m^2
	magnetic field strength	ampere per meter	A/m
	amount-of-substance concentration	mole per cubic meter	mol/m^3
	luminance	candela per square meter	cd/m^2
	mass fraction	kilogram per kilogram, which may be represented by the number 1	$kg/kg = 1$



מבוא למערכות משולבות חיישנים (הרצאה 2)

1. מטרת הקורס
2. מבנה הקורס (נושאי לימוד)
3. דוגמאות
4. כללי הזהב וסיווג חיישנים
5. מערכות משולבות חיישנים: דוגמאות
6. גישה מערכתית ומפרטים
7. מפרט סטטי ומקורות שגיאה