# ٨ـ كيف تبنى "روبوت" حقيقى؟

## المستشعرات اللمسية Tactile Sensors

د. علاء خميس
كلية هندسة البترول - جامعة قناة السويس

تعتبر حاسة اللمس من الحواس المكملة لمنظومة الإحساس البشرى والتى تشمل التعرف على الأغراض التى يتعامل معها الإنسان.. أى حاسة معرفة الأشياء باللمس Stereognosis وكذلك حاسة الإدراك الموضعى To-pognosis.. أى المقدرة على تحديد مواضع الإحساس أو التنبيه الجلدى. وفى الجسم البشرى.. تتوزع أعصاب الإحساس فى جلد الإنسان.. حيث يوجد ما يقرب من خمسة عشر مركزاً لمختلف أنواع الإحساس العصبى.. مما يجعل الجلد أهم أجزاء جسم الإنسان إحساساً بالتغيرات الخارجية. ولذلك أيضاً.. تختلف حاسة اللمس عن باقى الحواس (مثل الرؤية أو التذوق أو الشم) فى أنها ليست موجودة فى مكان معين ولكنها موزعة فى أنحاء جسم الإنسان مع تركيز كبير لها فى أصابع اليد.. مما يساعد الإنسان على التعرف على مجموعة كبيرة من صفات الأغراض المادية التى يتعامل معها (الشكل والمرونة ونوع النسيج ودرجة الاحتكاك ودرجة الحرارة والوزن والحركة..) من خلال شبكة هائلة من النهايات العصبية المعقدة فى تركيبها وطريقة عملها.

وكما هو موضح بالشكل رقم (١).. تمثل منظومة الإحساس اللمسى فى الإنسان منظومة تحكم مغلقة الحلقة Closed Loop.. حيث يعمل الجلد عمل المستشعر اللمسى الذى يقوم بتوفير التغذية المرتدة Feedback بتحويل المنبهات الميكانيكية أو الحرارية Stimulti إلى إشارات عصبية ترسل إلى المخ ليتم توليد إشارات تحكم فى المنظومة الحركية للإنسان.. كاستجابة لتلك المنبهات. ويمكن أن تكون هذه الاستجابة فى صورة إبعاد اليد عن مصدر حرارى تجنباً للاحتراق أو تحديد القوة اللازمة لرفع غرض معين.. إلخ.

ولإكساب «الروبوت» حاسة اللمس.. يقوم مصممو «الروبوتات» بمحاكاة منظومة الإحساس اللمسى فى الإنسان من خلال تزويد «الروبوت» بمستشعرات لمسية تقوم بتوفير معلومات عن حالة التصادم مع العوائق التى تحيط «بالروبوت» أو صفات الغرض المادى المراد التعامل معه.. ليتم بعد ذلك التحكم فى حركة «الروبوت» فى حالة التصادم.. أو التحكم فى حركة وقوى الذراع «الروبوتى» للتعامل مع غرض مادى حقيقى مثل أجزاء تجميع أو عينات أو غرض افتراضى Virtual Object كما هو الحال فى وحدات المحاكاة Simulators والحقيقة الافتراضية Virtual Reality.

وقد ساعد الفهم العميق لمنظومة الإحساس اللمسى فى الإنسان مصممى «الروبوت» على تطوير كثير من المستشعرات اللمسية.. وإن كانت القدرة اللمسية لأكثر الأذرع «الروبوتية» تطوراً لا تتعدى إلى الآن القدرة اللمسية وقدرة التقاط الأشياء لطفل عمره عامين ـ كما يقر بذلك علماء معمل اللمس بمعهد MIT للتكنولوجيا ـ ولكن اليد «الروبوتية» تتميز بالقدرة على تحمل ظروف العمل الصعبة مثل العمل فى درجات حرارة مرتفعة أو تحت ضغط عال أو عند تناول المواد المشعة.

### المستشعرات اللمسية فى التطبيقات «الروبوتية»

**أ ـ تحديد حالة الاصطدام:**

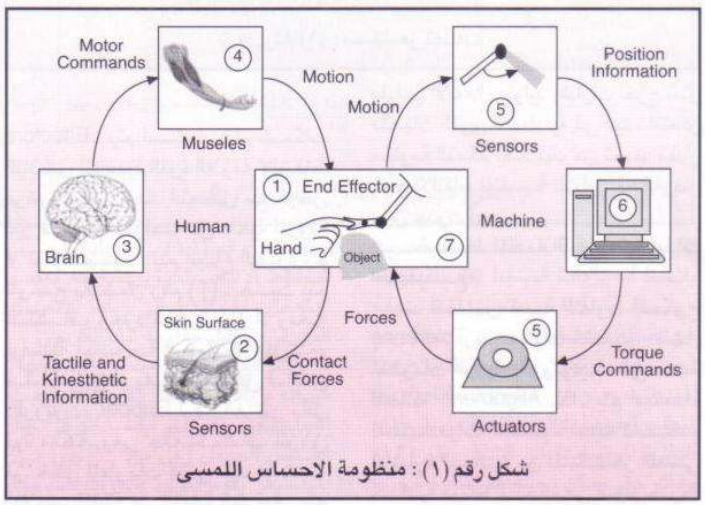
توفر المستشعرات اللمسية معلومات عن وجود أو عدم وجود حالة تصادم بين «الروبوت» والعوائق المحيطة. وتعطى الإشارة الصادرة من مستشعر الاصطدام أولوية قصوى Highest Pri-ority فى منظومة التحكم «الروبوتية».. وذلك لحماية «الروبوت» من الأذى.

**ب ـ تحديد صفات الأغراض:**

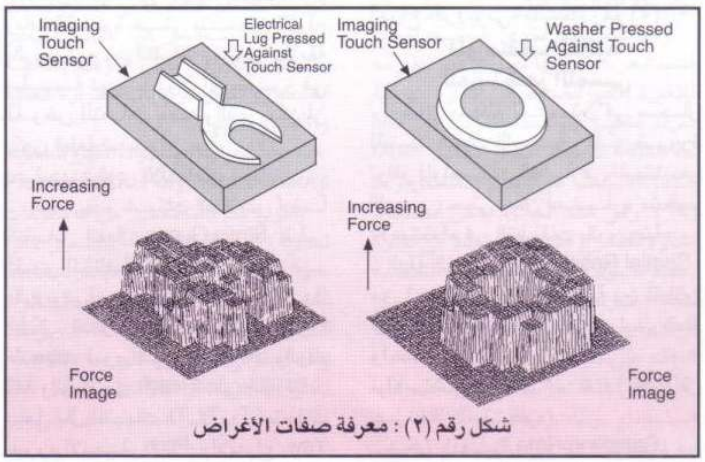
تتيح شبكات التلامس المكونة من مصفوفة من المستشعرات اللمسية.. إمكانية قياس الضغط المسلط على نقاط مختلفة وبالتالى يمكن معرفة صفات الغرض المادى المتعامل معه. ويوضح الشكل رقم (٢) كيفية استخدام شبكات التلامس التى تسمى أحياناً بالجلد الاصطناعى Artificial Skin فى تحديد صفات بعض الأغراض المادية.. مثل المفاتيح الكهربية والجلب.. عن طريق تحويل الضغط المسلط على نقاط مختلفة فى مصفوفة التلامس إلى إشارة كهربية يمكن استخدامها فى تكوين صورة لشكل الغرض الذى يتعامل معه «الروبوت».

**جـ ـ تحديد حالة الانزلاق Slip Detection:**

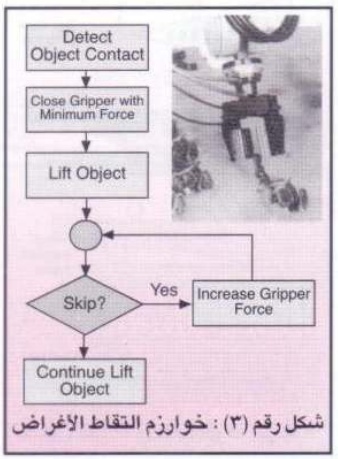
فى النهايات الطرفية للروبوت End



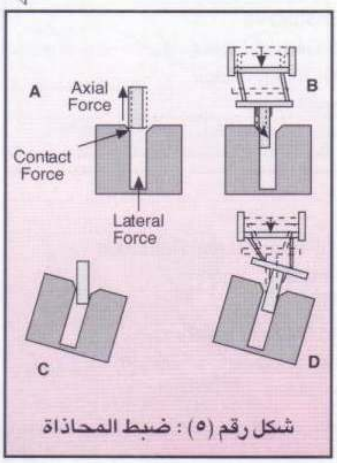
شكل رقم (١) : منظومة الاحساس اللمسى



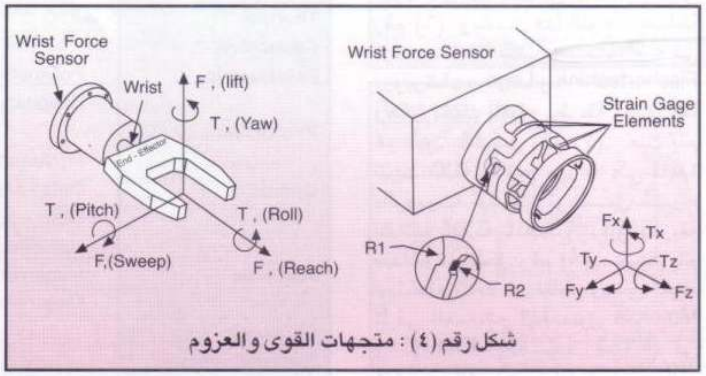
شكل رقم (٢) : معرفة صفات الأغراض



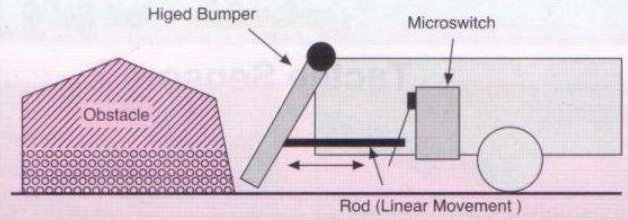
شكل رقم (٣) : خوارزم التقاط الأغراض



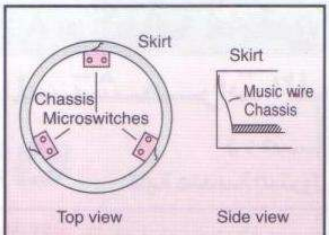
شكل رقم (٥) : ضبط المحاذاة



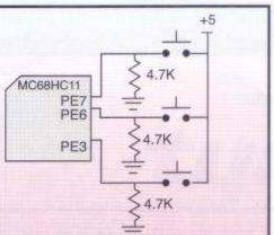
شكل رقم (٤) : متجهات القوى والعزوم



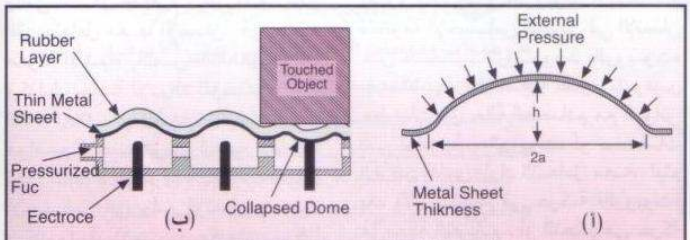
شكل رقم (٦) : مستشعر تصادم



شكل رقم (٧) : تثبيت مفاتيح التلامس



شكل رقم (٨) : توصيل مفاتيح التلامس



شكل رقم (٩) المستشعر النيوماتيكى

Effectors.. يتم استخدام شبكات التلامس لتحديد القوة اللازمة لالتقاط غرض معين. فعند التعامل مع غرض غير معروفة خواصه من ناحية المرونة أو نوع النسيج.. يتم اتباع الخوارزم الموضح بالشكل رقم (٣).. حيث يتم اكتشاف وجود الغرض المراد رفعه بواسطة منظومة الرؤية «الروبوتية» مثلاً.. ليتم بعد ذلك غلق قابض «الروبوت» Gripper لرفع الغرض بأقل قوة ممكنة. وفى حالة اكتشاف انزلاق من خلال المعلومات التى توفرها شبكة التلامس المثبتة فى النهاية الطرفية.. يتم زيادة القوة حتى يتمكن الذراع «الروبوتى» من التقاط الغرض بطريقة سليمة دون حدوث أى ضرر فى الغرض المتعامل معه والذى يمكن أن يكون قطعة تجميع أو عينة.

**د ـ تحديد قوى الالتقاط:**

تستخدم شبكات التلامس أيضاً كمقياس انفعال Strain Guage لقياس القوى المختلفة المسلطة على أجزاء اليد «الروبوتية» ـ شكل رقم (٤). وفى هذا الشكل.. تمثل المتجهات Fx, Fy, Fz متجهات قوى الجرف Sweep والرفع Lift والوصول Reach على الترتيب.. بينما تمثل المتجهات Tx, Ty, Tz متجهات عزوم الانحدار Pitch والانعراج Yaw والدوران Roll على الترتيب. ويقوم مقياس الانفعال بتوليد إشارات خرج تمثل متجهات القوى الأساسية فى اليد.. لتتمكن منظومة التحكم بعد ذلك من تحديد مقدار قوى الالتقاط المناسبة للتعامل مع الغرض دون حدوث أى ضرر.

**هـ ـ ضبط المحاذاة فى عمليات التجميع:**

عند انخفاض قيمة التفاوت المسموح Tolerance فى عمليات التجميع.. تفشل منظومات الرؤية «الروبوتية» فى ضبط المحاذاة Alignment. لذا.. يتم استخدام المستشعرات اللمسية حيث تستخدم الإشارة الصادرة من المستشعر اللمسى كتغذية مرتدة للتحكم فى اتجاه حركة الذراع «الروبوتى» بالشكل رقم (٥).

## المواصفات المثالية للمستشعر اللمسى

يتفق معظم الباحثين فى مجال المستشعرات اللمسية.. على ضرورة توافر المواصفات التالية فى المستشعر اللمسى حتى يمكن اعتباره مثالياً للاستخدام فى التطبيقات «الروبوتية»:

ـ الدقة الحيزية Spatial Resolution.. من ١ ـ ٢ مم (أقل مسافة بين نقطتين لكى يمكن اعتبارهما نقطتين وليس نقطة واحدة).

ـ الاستشعارية.. من ٠,٥ ـ ١٠ جم (أقل حمل يمكن استشعاره).

ـ معدل المعاينة Sampling Rate.. من ١٠٠ هرتز ـ ١ ك هرتز.

ـ حجم المصفوفة فى إصبع الروبوت.. من ١٠×٥ ـ ٢٠×١٠.

ـ زمن استجابة كل عنصر من عناصر المصفوفة.. من ١ ـ ١٠ ملى ثانية.

ـ القدرة على تحمل العمل فى بيئات صناعية.. (يجب أن يكون السطح خشناً بدرجة كافية).

ـ انخفاض التكلفة.

## أنواع المستشعرات اللمسية

يغطى الاستشعار اللمسى كل طرق الاستشعار التى تتطلب وجود اتصال فيزيائى بين المستشعر والغرض الخارجى. وقد تم إنتاج كثير من المستشعرات اللمسية بتقنيات مختلفة كما هو موضح بالجدول رقم (١).. والتى تحقق بدرجات متفاوتة المواصفات المثالية المذكورة سابقاً.. وتعتمد فكرة عمل معظمها على تشوه طبقة من اللدائن المرنة عند تعرضها للضغط.

يعرض هذا المقال طريقة عمل واستخدام بعض أنواع المستشعرات اللمسية التى يكثر استخدامها فى مجال «الروبوتية»..

### أ. المفاتيح Switches

**١ ـ المفاتيح الدقيقة Microswitches:**

فى هذا النوع.. يتم استخدام مفاتيح دقيقة Microswitches مع واقى صدمات Bumper.. ويتم تثبيت ذراع على المفتاح الدقيق لتخفيض القوة اللازمة لتفعيل المفتاح ـ شكل رقم (٦). ويتميز هذا النوع.. ببساطة تركيبية.. لذا يكثر استخدامه فى «روبوتات» Lego.و Fischertechink ويمكن تثبيت المفتاح بطريقة أخرى كما هو مبين بالشكل رقم (٧).. حيث يتم تثبيت ثلاثة مفاتيح موزعة على قاعدة «الروبوت». ويمكن توصيل خرج المفاتيح الثلاثة بالمعالج الدقيق بطريقة مباشرة ـ شكل رقم (٨) ـ حيث يتم استخدام ثلاث من نقاط توصيل الميناء E فى المعالج الدقيق Motorola MC68HC11 (العدد رقم ٧٦). فى هذا الحالة.. نجد أنه عند اصطدام «الروبوت» بأى عائق.. يغلق مفتاح أو مفتاحان ـ حسب منطقة التصادم ـ مع قاعدة «الروبوت» مما يؤدى إلى تغير خرج المفتاح من صفر إلى ١.

**٢ ـ مستشعرات التلامس النيوماتيكى Pnuematic Touch Sensors:**

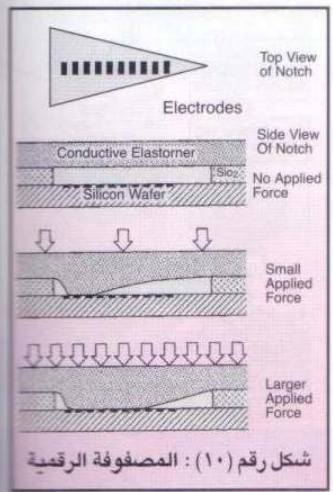
استخدم هذا المستشعر فى الماضى فى بعض لوحات مفاتيح الحاسبات والآلات الحاسبة.. وتعتمد فكرة عمله على استخدام قبة معدنية رقيقة Metal-lic Dome ـ شكل رقم (٩ ـ أ) ـ حيث يتغير شكل القبة عند تعرضها لضغط خارجى طبقاً لنظرية الانبعاج المرن Elastic Buckling. ويمكن وصف هذا التغير باستخدام معامل هندسى Geo-metrical Paramter(λ) ومعامل حمل Load Paramter (R) باستخدام المعادلتين التاليتين:

$$\lambda^2 = (a^2 / t.r)\sqrt{12\,(1-\upsilon^2)}$$

$$R = (P/E)\,(a/t)^4\,(1-\upsilon^2)$$

حيث: P الضغط المسلط ـ E معامل Young للمعدن المستخدم ـ υ معامل Poisson للمعدن.

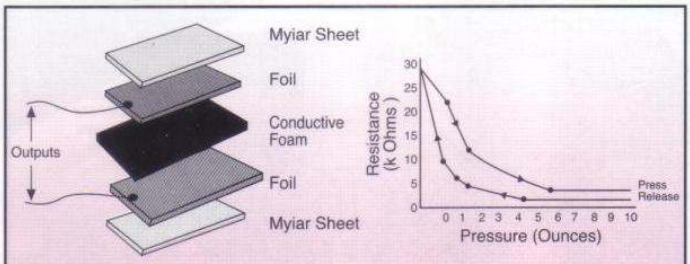
ولحدوث القطع Switching Action .. يجب أن تكون قيمة λ مابين ٢,٠٨ ـ



شكل رقم (١٠) : المصفوفة الرقمية

جدول رقم (١): أنواع المستشعرات اللمسية

| Technology | Types |
|---|---|
| Switches | - Microswitches<br>- Penumatic Touch Sensors<br>- Digital Tactile Sensor Arrays |
| Piezoresistive | - Conductice Elastomers<br>- Carbon Felt & Carbon Fibers<br>- Semiconductor Strain Guage |
| Thermal | |
| Capacitive | |
| Peioelectric | - Polymers<br>- Resonance |
| Photoelasticity | |
| Optical | - Frustratation of Total Internal Reflection<br>- Opto - Mechanical<br>- Fiber - Optic<br>- Hall Effect and Magnetoresistance |
| Magnetic | - Magentoelastic<br>- Magentoinducatance |
| Ultrasonic | |
| Electrochemical | |




شكل رقم (١١) : مستشعر انحناء

٦.. وهو مـا يحـدده نوع المـعـدن المستخدم. ويمكن تشكيل شبكة تلامس باسـتـخـدام هذا المفـتاح كـما هو مـبين بالـشكل رقم (٩ ـ ب). ويـعـيـب هذا النوع.. أن قـوى القص Shear Force لا تسبب انبعاج المستشعر بدرجة كافية لحـدوث القطع.. بالإضافـة إلى قابلية القبة المعدنية الرقيقة للتلف فى ظروف التشغيل الصناعية.

### ٣ ـ المصـفوفـات الرقمـيـة Digital tactile senson Array:

تعتمد فكرة عمل هـذا المستشعر على تقنيـة Very Large Scale Intergration (VLSI). عند ضـغط لوح معـدنى مـرن فى ثقب دائـرى.. فـإن انحـراف المعدن وعـمقـه فى الثقب يتناسـبان مع قـيـمـة الضـغط المسلط وحـجم الثـقب ومعامل مرونة مادة اللوح:

$$\delta \alpha Pa/E$$

حـيث δ.. أقـصى انحـراف ـ P الضغط المسلط ـ a نصف قطر الثقب ـ E معامل المرونة.

يمثل الشكـل رقم (١٠) حـالة ضـغط لوح معـدنى فى فتـحة على شـكل حرف V.. حـيث يتطلـب ذلك زيادة الضـغط لامكانية إجـبار اللدينة المرنة Elastomer على المرور فى الثقب نظراً لضيقه. وقد تم استخدام هذه الفكرة فى إنتاج مصفوفات مفاتيح مـصغرة Miniature بوضع لوح يحتوى على العديد من الثقوب تحت طبقة من الألومنيـوم تمـثل الكتـرود.. ووضع طبقـة من لدينة موصلة تشكـل الالكترود الآخـر. وبزيادة الـضـغط على الطبـقـة المحـتـوية علي اللدينة الموصلة ـ شكل رقم (١٠) ـ يتم إجبار اللدينة على المرور داخل الثـقوب والاتصـال بالكترود الالومنيـوم. وتحتوي الرقـاقة السليكونية المثبـتة أسفل طبـقة الألومـنيوم على دائرة الـكترونـية لاكـتـشاف حالة كل مـفـتـاح وتحويل هذه المعلومـات إلى إشـارة رقمـيـة تعبـر عن صفات الغرض المادى الملامس للشبكة.

### ب. مستشعرات المقاومة الضغطية Piezoresistive Sensors

### ١ ـ اللـدائن المـوصلـة Conductive Elastomers:

يمـكن تـشـكـيل الـلـدائن المـوصلـة باستخدام المطاط المعـتمد على السليكون والذي يمكن إكسابه خاصـية التوصيلية بإضافة شوائب موصلة أو شبه موصلة مـثل الفضـة أو الكربون. ويتـمـيـز هذا المطاط بانخـفـاض الـتكلفـة وسـهـولة الاسـتـخـدام بالاضافـة إلى المرونة التي تسـهل عمليـة التـقاط الأغـراض.. وفى نفس الوقت القدرة على تحمل العمل فى البيئات الصناعية. تعتمد فكرة العمل على توفير مقـاومة متغيرة مع تغـير الضغط الواقع على المسـتـشـعـر أو تغـير درجـة انحناء المستشعر. ويمكن أيضاً استخدام رغـوة مـوصلة Conductive Foam كلدينة تتغير مقاومـتها مع تغير الضغط ـ شكل رقم (١١).

ويوضح الشكـل.. تغـيـر مـقـاومـة الرغـوة المـوصلة مع الضـغـط.. حـيث يلاحظ أنه بزيادة الضغط تقل المقـاومة. ويلاحظ أيضاً تغـير منحنى الاسـتـجابة فى حـالة الضـغـط عـنه فى حـالة رفع الضـغـط.. وتكون إشـارة خـرج هذا المسـتـشـعـر فى صـورة تناظرية مما يتطلب تحويـلها إلى رقمـية باسـتـخدام الدائرة الموضحـة فى الشكل رقم (١٢) وذلك حتي يمكن استخدام إشارة الخرج بواسطة المعالج الدقيق.

وهناك طريقـة أخرى لاسـتـخدام هذا المستشعر.. يتم فيها تحويل قيم المقاومة المتغيرة بتغير الضغط إلى إشارة كهربية بتردد متغيـر باستخدام المؤقت NE555 Timer IC كوحدة اهتزاز متعدد Multi-vibrator كـمـا هو مـبين بـالشكل رقم (١٣). وفى هذه الحالة.. يمكن استخدام إشارة الخـرج متـغير الـتـردد فى دائرة تحكم مـؤازر Servo مـغلق الحلقـة لضبط سرعة حركة «الروبوت» الجوال أو الذراع «الروبوتى» حـسب الضـغط الواقع على المستشعر.

كما أن هناك طريقة أخـرى.. يتم فيها اسـتـخدام بوابات منطقـية NAND بدلاً من المـؤقت ٥٥٥ ـ شـكل رقـم (١٤) ـ للحصول على إشارة خرج بتردد متغير مع تغير الضغط.

ومن المواد الجديدة المسـتخدمة حـاليا مـادة Quantum Tunnelling Composite (QTC).. وهى نوع من البوليـمر المحـتـوى على جزيئات غيـر موصلة فى الحالة العادية ولكنها تسمح بمرور التيار الكهربى فى حالة شدها أو ضغطها.

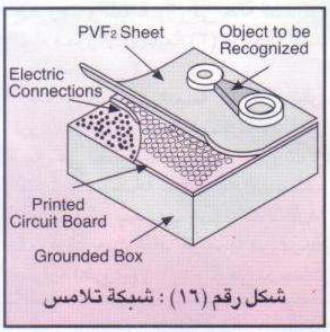
### ٢ ـ لبـاد وألـيـاف الكربون Carbon Felt and Carbon Fibers:

تم إنتاج هذا المسـتشعـر بوضع لباد وألياف كربونية بين الكترودين موصلين ـ الشكـل رقم (١٥) ـ وبزيادة الحـمل تنضغط الالياف الكروبونيـة مع بعضها البـعض مما يـؤدى إلى زيادة الاتصـال الكهربى وتقليل مقاومة لباد الكربون.

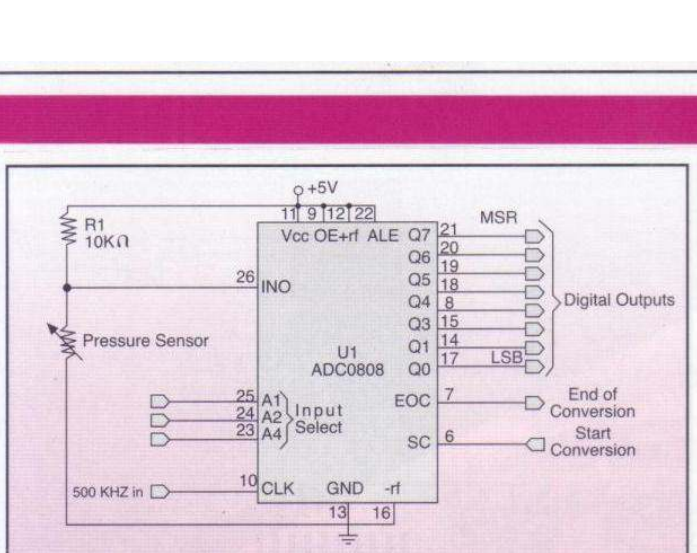
وكما هو مبين فى منحنى الاستجابة.. فـإنه بزيادة الحـمل تقل مـقـاومـة المستـشعر. ويلاحظ أيضـاً أنه فى حالة إنقـاص الحـمل (أقل من ١٠ جم) فـإن المستشعر يقوم بتوليد إشارات ضوضاء كهربية كما هو الحادث فى الميكروفونات الكربونيـة. يتـمـيـز هذا المسـتـشـعـر بالخـشـونة وفى نفس الـوقت إمكانيـة التشكيل وتحمل درجـات الحرارة العالية والأحمال الكبيرة.

### جـ ـ مستشعرات البوليمرات الكهروضغطية Piezoelectric Polymers Sensors

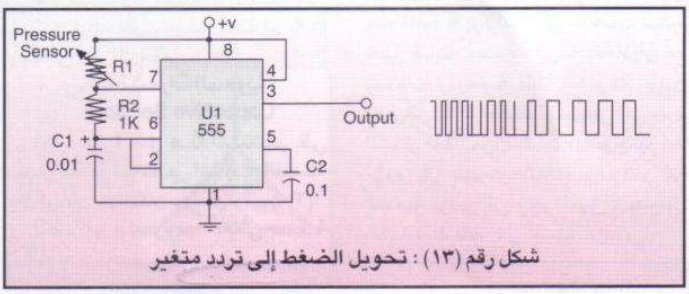
يتكون هذا المستشعـر من مصفوفات لمسـية Tatctile Arrays تحـتـوى على مـواد تصـدر إشـارات كـهـربيـة عند تشـوهـهـا بالضـغـط مـثل المواد الكهروضـغطية Piezoelectric.. ومنها مادة البـولى فينيلدين فلوريد Fluoride polyvinylidene (PVF2) ـ شكـل رقم (١٦) ـ التى يكثـر اسـتـخدامهـا فى هذا



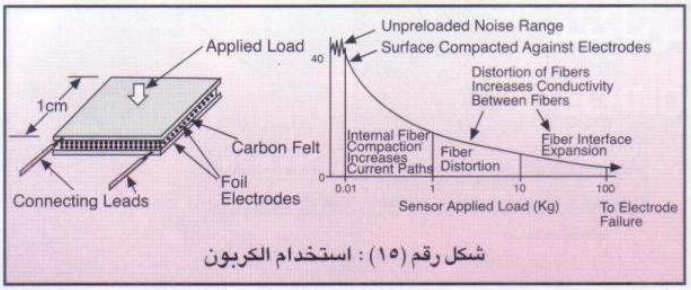

شكل رقم (١٦) : شبكة تلامس



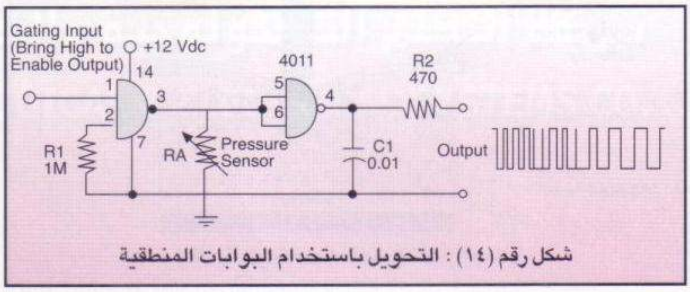

شكل رقم (١٢) : محول تناظرى / رقمى



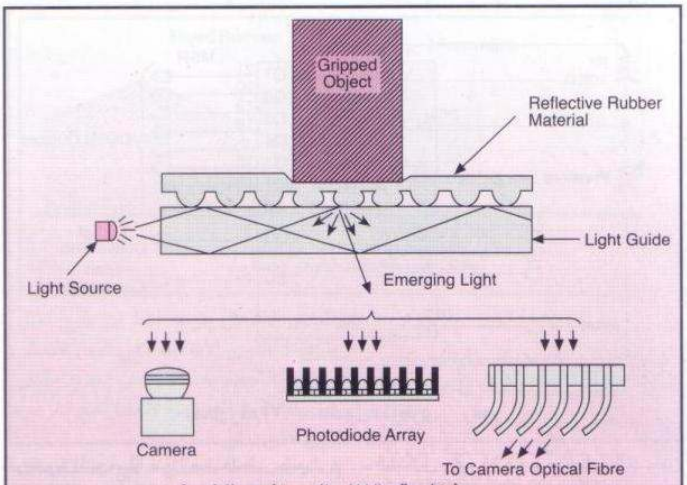

شكل رقم (١٣) : تحويل الضغط إلى تردد متغير




شكل رقم (١٥) : استخدام الكربون




شكل رقم (١٤) : التحويل باستخدام البوابات المنطقية



شكل رقم (١٧) : المستشعر الضوئى

النوع من المستشعرات.. وهى نوع من البوليمر الذى يولد شحنة كهربية عند تعرضه للضغط. ويمكن تشبيه هذا السلوك بسلوك المكثفات الكهربية.

تتناسب الشحنة المتولدة على سطح شريحة من مادة PVF2 مع الضغط المسلط. ويمكن وصف العلاقة بين الشحنة المتولدة على الوجه a والضغط المسلط على الوجه b من الشريحة باستخدام الثابت dab حيث:

$$d_{ab} = [(\text{Charge/Area})/(\text{Force/Area})]\ (C/N)$$

وعلى سبيل المثال.. ففى حالة شد شريحة من هذه المادة.. تتولد شحنات على سطح المادة ولتكن z تعتمد على قيمة واتجاة الشد. لذا.. تعطى ثلاث قيم للثابت d هى:

$d_{zx} = 23 \times 10^{-12}$ (C/N) (1)

$d_{zy} = 3 \times 10^{-12}$ (C/N) (2)

$d_{zz} = 32 \times 10^{-12}$ (C/N) (3)

( القيمة (١) فى حالة الشد فى اتجاه محورx.. والقيمة (٢) فى حالة الشد فى اتجاه محور y.. والقيمة (٣) فى حالة الشد فى اتجاه محور z).

يمكن تشكيل لدينة PVF2 نظراً لمرونتها حول أسطح منحنية كما هو الحال فى أصابع «الروبوت».. وهى تتميز أيضاً باستجابة خطية مع مختلف الاحمال. يعيب هذه المادة تأثرها بالحرارة.. حيث تفقد خواصها فى درجة حرارة أعلى من ١٠٠م.. وفى درجات المنخفضة تولد جهداً كهربياً عند تغير درجة حرارتها نتيجة التأثير الكهروحراري.

### د. المستشعرات الضوئية
### Optical Sensors

#### ١ ـ مستشعر الانعكاس الداخلى المحبط: Frustrated Internal Reflection

تعتمد فكرة عمل هذا المستشعر على ظاهرة الانعكاس الداخلى. فكما هو معروف.. يحدد معامل الانعكاس كمية الضوء المنعكس على سطح فاصل بين وسطين ويعرف على أنه نسبة سرعة الضوء فى الفراغ إلى سرعته فى الوسط (n=c/υ).

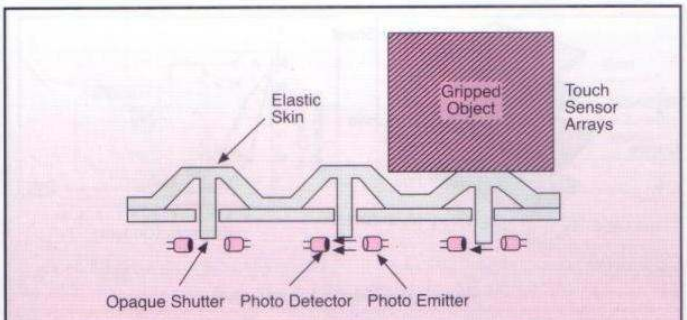
تحدث ظاهرة الانعكاس الداخلى فى حالة انتشار الضوء بين وسطين وسقوطه بزاوية سقوط أقل من الزاوية الحرجة.. حيث:

$$\text{Sin}\ \theta_c = n_2 / n_1 \qquad (\text{for } n_1 > n_2)$$

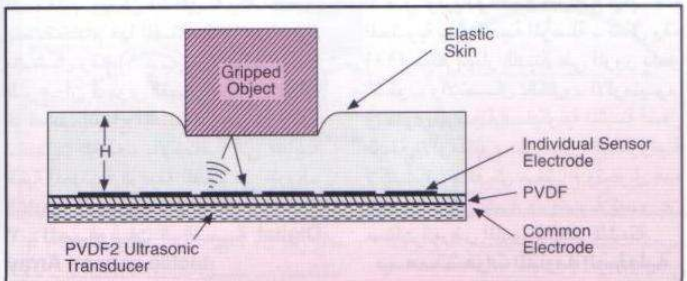
وفى هذا المستشعر.. يستخدم البلاستيك الشفاف كدليل للضوء. ويؤدى اتصال سطح هذا الدليل بغرض خارجى إلى إحباط الانعكاس الداخلى عند نقطة الاتصال. ويمكن استقبال الضوء المشتت بواسطة شبكة من «الدايودات» الضوئية أو مستشعر ضوئى أو ألياف ضوئية لتحديد حالة الاتصال بالأغراض الخارجية ـ شكل رقم (١٧).

#### ٢ ـ المستشعرات الضوئية الميكانيكية: Opto - Mechanical Sensors

يوضح الشكل رقم (١٨) فكرة عمل هذا المستشعر.. وفيه تستخدم طبقة مرنة من المطاط بالاضافة إلى وحدات إرسال واستقبال ضوئية.



شكل رقم (١٨) : المستشعر الضوئى الميكانيكى



شكل رقم (١٩) : مستشعر موجات فوق سمعية

### هـ. المستشعرات فوق السمعية
### Ultrasonic Sensors

يستخدم مقياس السمك المعتمد على الموجات فوق السمعية بكثرة فى قياس سمك طبقات الطلاء وسمك الألواح المعدنية.. ويعتمد على إرسال موجة فوق سمعية واستقبالها بعد اصطدامها بالسطح المراد تعيين سمكه. وبالأخذ فى الاعتبار أن سرعة الصوت فى المعدن معروفة.. فبقياس زمن رحلة الموجه يمكن معرفة المسافة المقطوعة.. ومنها يمكن معرفة السمك. بالرجوع إلى الشكل رقم (١٩).. نجد أن H تمثل سمك المادة المرنة و Vs سرعة انتشار الصوت فى المادة و tf زمن رحلة الموجه بين وحدتى الارسال والاستقبال:

$$tf = 2H/Vs$$

عند حدوث اصطدام لأغراض خارجية.. يقل سمك المادة المرنة H وبالتالى زمن الرحلة.

### و. المستشعرات السعوية
### Capacitive Sensors

تعتمد فكرة عمل هذا المستشعر على تغير السعة مع تغير المسافة الفاصلة بين لوحين موصلين ـ شكل رقم (٢٠). فكما هو معروف.. تعطى سعة المكثف الكهربى بالعلاقة:

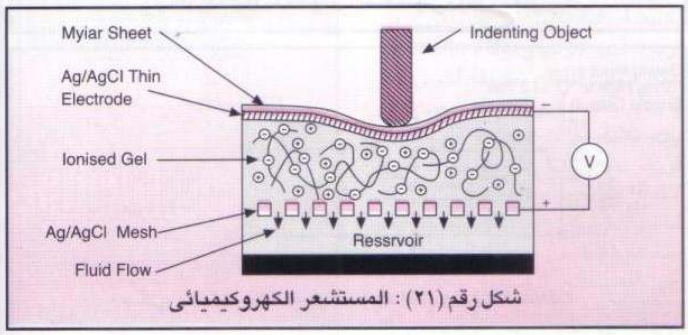
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / S$$

حيث.. A مساحة لوح المكثف ـ C السعة ـ $\varepsilon_0$ معامل السماحية المطلق للفراغ $\varepsilon_r$ معامل السماحية النسبى لمادة العازل ـ S المسافة الفاصلة بين اللوحين.

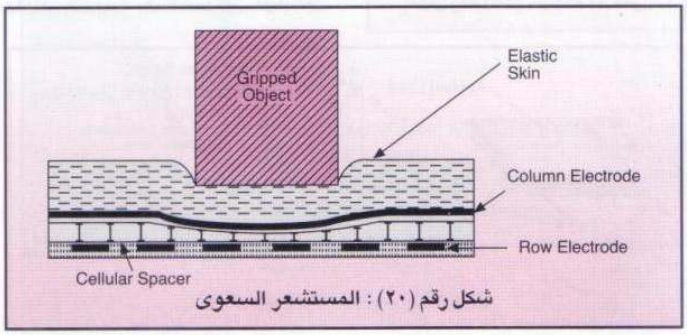
عند تحميل المستشعر بحمل ما.. تتغير المسافة الفاصلة بين لوحي المكثفات وبالتالي تتغير السعة. يمكن استخدام هذا المستشعر فى قياس القوى العمودية وقوى القص أيضاً.

### م. المستشعرات الكهروكيميائية
### Electrochemical Sensors

تتميز المواد الجيلاتينية المشبعة كيميائيا Chemical - Impregnated Gels بالحساسية ضد التشوه مما يتيح إمكانية استخدامها فى إنتاج مستشعرات تلامس ـ شكل رقم (٢١). وتحتوى هذه المادة الجيلاتنية على شحنات سالبة غير قابلة للحركة فى حالة اتزان مع شحنات موجبة قابلة للحركة. يؤدى تعرض المادة لضغط خارجى إلى طرد السائل المشحون بشحنات موجبة مما يؤدى إلى حدوث حالة عدم تجانس فى الشحنة تؤدى إلى وجود فرق جهد يمثل الضغط المسلط على المستشعر.



شكل رقم (٢١) : المستشعر الكهروكيميائى



شكل رقم (٢٠) : المستشعر السعوى