

電氣技術者를 위한

産業用 로봇 技術

(11)

5. 産業用 로봇 人工知能化의 基礎

가. 序 文

버서트랜, 유니메이트의 導入을 계기로 하여 産業用 로봇에 대한 産業界의 관심이 현저히 높아지고 그후 많이 보급 발전되었다. 이런 産業用 로봇은 記憶, 再生機能을 갖고, 사람에 의해 敎示된 동작을 敎示된 순서대로 반복 實行할 수 있는 점이 종래의 專用 自動機械와는 다르고 多種少量生産 라인의 自動化에 공헌해 왔다. 그러나 초기의 (현재도 大多數의) 産業用 로봇은 敎示된 動作을 단지 반복할 뿐으로, 작업환경이 변화하거나 작업 대상물의 種類가 많고 더구나 그것들이 不規則하게 배치되어 있는 경우 등에는 적용되지 못하였고 그런 의미로 適應性, 柔軟性이 결여되어 있다.

산업용 로봇에 환경이나 작업 대상물을 계획·인식하는 機能을 부여하여 狀況에 따라서 수정 동작을 하면서 11의하는 작업을 수행하는 能力을 갖게 할 수 있으면 適應性和 柔軟성이 풍부

한 機械로 할 수 있다. 이와 같은 로봇을 適應 로봇 또는 다음에 설명하는 사항과도 관련시켜서 知能 로봇이라고 한다.

한편, 情報(계산기)科學의 分野에서 계산기를 數值計算 이외의 목적을 위해 이용하는 研究가 활발해지고 특히 1960년경부터 미국의 메사츄세츠 공과대학이나 스탠포드 대학 등에서 계산기에 TV 카메라를 접속해서 얻어진 兩像信號를 처리해서 3차원 物体의 특징 추출이나 식별을 하거나 머니플레이터를 결합하여 積木の 世界를 대상으로 한 TV 회상의 해석 결과에 기초해서 積木을 조작시키는 實驗이 진행되어 세간의 주목을 받았다.

이런 연구와 1955년경부터 진행된 체커나 체이스 등의 게임이나 각종 퍼즐을 계산기에 시키기 위한 프로그램 연구가 統帥되어 계산기의 새로운 利用分野를 開拓하고 知的인 정보처리기구 해명의 실마리를 얻으려는 여러가지 시도가 人工知能의 연구라는 이름 밑에 세계 각지에서 활발하게 전개되었다. 특히 TV 카메라나 머니플

레이터를 利用한 研究는 知能 로봇으로서 人工 知能 연구의 큰 기둥을 형성했다.

이 立場에서의 연구의 目的은 人間을 중심으로 한 知的인 정보처리 메커니즘의 해명이며 그 계산기에 의한 實現이었다. 이런 知能 로봇 연구의 내용은 TV 카메라에서 입력된 映像情報의 해석에 기초한 物體의 인식과 그 조작이며 作業目的을 달성하기 위한 순서를 자동적으로 生成하는 自動 프로그래밍(로봇 플랜닝)法의 개발이었다. 그러나 이런 테마는 어느 것이나 단기간에는 해결할 수 없는 큰 문제를 내포하고 있으며 현재도 精力의인 연구가 진행되고 있다.

이와 같이 知能 로봇의 연구 자체는 반드시 최초의 생각대로의 成果를 가져오고 있지 않지만 거기서 개발된 여러가지 手法는 기술적 潛能으로서 産業用 로봇계에 큰 영향을 주어 시각장치나 로봇用 프로그래밍 言語 등의 개발에 여러가지 형태로 공헌하고 있다.

이 장에서는 觸覺이나 視覺 등의 感覺機能과 그 응용, 그리고 그런 感覺器를 구비한 適應(知能) 로봇에 대해 해설하고 人工知能과의 關係에 대해 설명한다.

나. 로봇과 知覺

單純한 반복형 産業用 로봇은 환경의 변화에 따라서 적절한 처치를 취하는 能力을 갖지 못하고 그 적용 범위도 아주 한정된 것이 된다. 사람은 作業의 目的과 大體的인 순서를 가르쳐주면 소소한 狀況의 변화에 대해서 지장없이 作業을 진행할 수 있다. 사람에게서는 視覺, 觸覺, 聽覺, 嗅覺, 味覺 등 이른바 5感이 구비되어 있고 狀況의 변화를 인식하여 그 때마다 적절한 처치를 할 수 있기 때문이다.

예를 들면 사람은 視覺으로 자기 주위의 全般의인 狀況을 파악할 수 있음과 동시에 作業 대상물의 形狀, 性質, 相互關係 등의 인식이나 핸들링 個所의 확인, 조합 部品의 위치 조정 등을 할 수 있고 촉각, 力覺, 슬립각, 경우에 따라서는 聽覺의 힘을 빌려서 미묘하고 복잡한 작

업을 능숙하게 수행해 갈 수 있다. 産業用 로봇에게 人間 수준의 能力을 기대하는 것은 無理라고 하더라도 어느 정도의 감각 기능과 여러가지 狀況 변화에 대한 對應策을 가르쳐 두면 그 作業 能力을 비약적으로 높일 수가 있다.

또 복잡한 作業뿐 아니라 物體를 정확히 쥐거나 物體를 겹치거나 부딪치지 않게 물건을 운반하거나 而이나 가장자리에 따라서 物體를 미끄러뜨리는 등 언뜻 보아, 간단한 것 같은 作業에서도 感覺의 도움을 빌지 않고서는 잘 실행할 수가 없다.

현재 여러가지 感覺 機能의 연구가 진행되고 있지만 實用性 또는 技術的인 立場에서 보아 로봇에게 중요한 것은 視覺과 觸覺일 것이다. 감각 기능은 데이터를 수집하는 感覺器(센서)와 그 데이터에서 필요한 情報를 抽出하는 處理部로 형성된다. 이 처리부의 내용도 千差萬別인데 간단한 接觸 센서처럼 信號의 有無 檢出로 끝날 경우도 있고 복잡한 視覺 處理처럼, 본격적인 패턴 인식 技法을 구사해야 할 경우도 있다.

또 처리된 感覺情報에 기초하여 로봇에 적절한 判斷과 行動을 시켜야 하지만 이 판단과 행동에 관해서도 여러가지 레벨이 생각된다. 일반적으로 일어날 수 있는 여러가지 경우에 對應하는 行動樣式을 미리 정해두는(프로그래밍해 두는) 方法이 채택된다. 그러나 조건에 따라 行動 패턴을 선택하는 方法은 조건의 數가 많아진 경우에 프로그래밍하는 것이 큰 일이고, 특히 치밀한 對應策을 생각하면 條件分岐의 수는 대단히 많아진다. 그래서 일부에 學習的인 요소를 도입해서 로봇 자체에 對應策을 생각하게 하거나 人間과 로봇의 交信을 빈번하게 하여 프로그래밍의 부담을 경감시키거나 로봇의 적응 能力을 높이거나 하는 方法이 생각되고 있다.

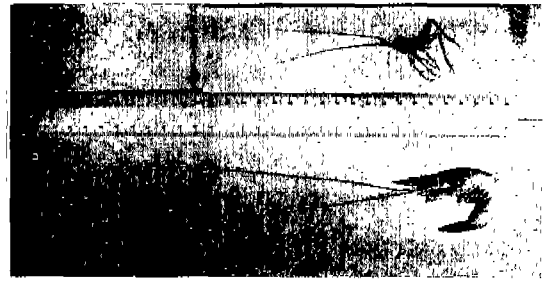
또 이 방식을 推進해나가면 人間과의 정보 교환을 가급적 원활하게 진행하기 위한 自然言語에 가까운 언어의 會話 能力이나 人間과 같은 汎用的인 처리 능력 등을 로봇에 갖게 하고 싶어진다. 그러나 이런 能力을 로봇에게 갖게 하는

것은 아주 어렵고 前節에서 언급한 人工知能의 연구 과제로서 현재 여러가지 접근이 시도되고 있지만 産業用 로봇에 직접 결부되는 成果는 아직 발견치 못한 것이 現狀이다.

다. 觸 覺

觸覺은 接觸, 衝擊, 壓迫 등의 機械的 자극에 대한 感覺의 총칭이다. 그 受容器는 많은 動物은 全身에 分布하고 있지만 곤충이나 甲殼類에는 頭部의 觸角에 集中해 있다. 귀뚜라미나 새우의 촉각은 그림 5·1처럼 몸 길이의 2.5~3배나 된다. 이 긴 촉각은 멀리 떨어진 物体의 存在나 位置, 크기의 확인, 나아가서 상대방 移動速度의 知覺, 먹이나 적의 발견, 틈에 숨을 때의 유도 등에 消費되고 있다. 産業用 로봇에 사용되는 觸覺 센서의 용도도 접촉 감각의 知覺이라는 것으로서 본질적으로는 이것과 다르지 않다.

단, 人工知能 로봇에 사용되는 觸覺에서는 觸覺情報는 배후에 있는 고도의 정보처리 기계를



〈그림 5·1〉 生物의 觸角

구사해서 로봇의 제어나 狀況의 인식, 고도의 判斷에 적극 이용된다는 특징이 있다. 이런 것에는 여러 종류의 觸覺 센서가 개발되어 있다.

接觸感覺의 종류나 感覺을 얻기 위한 工學的 센서, 檢出方法 등을 표 5·1에 정리했다. 이 표에 표시된 것처럼 촉각에는 여러가지 感覺이 있으며, 觸覺이 없으면 로봇은 종이컵을 지그르뜨리지 않고 살짝 집을 수도, 道具를 바꾸어 칠 수도 없다. 觸覺은 視覺의 補助로서 사용될 때도 있지만 로봇이 세밀한 핸들링을 할 때는 눈보다

〈표 5·1〉 촉각소자와 그 응용

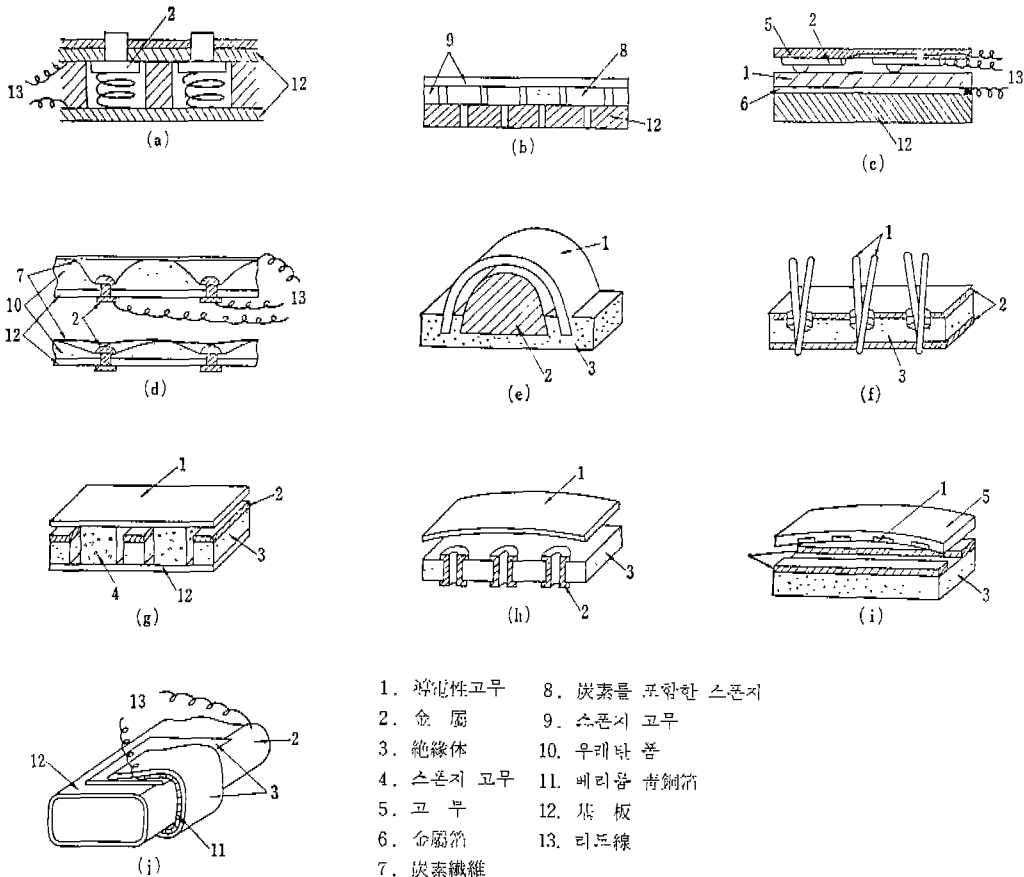
	檢出對象	應用의 目的	感覺 센서	間接的 檢出方式
接觸 覺	손끝과 對象物의 접촉 有無, 接觸 패턴의 검출	대상물체의 探索 對象物체의 確認 접촉패턴의 檢出 表面特性, 形狀의 認識	마이크로 스위치 近接 스위치 핀과 接點을 고밀도로 배치한 것	손가락의 닿는 각도로 검출 플렉시블 미러·비디오 信號 변환 遲延線에 의한 펄스 검출
壓 覺	손끝이 대상물에 주고 있는 힘, 또는 壓力	把握力의 제어 把握方法의 제어 유연성의 判定 操作者에의 피드백	반도체 感壓素子 스트레인 게이지 感壓 抵抗力 導電性 고무	노즐 플레퍼 板 스프링과 差動 트랜스 코일 스프링과 포텐셔미터
力 覺	팔이 내고 있는 힘 또는 받고 있는 힘	바이라테럴 서보제어 밀어 붙이는 制御 拘束作業의 實行 2개 팔의 協調制御	토크 검출기 스트레인 게이지	모터의 負荷電流 코일 스프링과 변위계
슬립 覺	손끝의 把握面과 수직 방향에의 物体 이동, 또는 비틀림	과약력의 設定값 결정 슬립의 防止 무게의 검출 걸쳐 쌓는 작업의 實行	(변형계) (光電 變換素子) (픽 업)	荷重變化檢出에 의한 測定 롤러의 회전변위검출에 의한 測定, 슬립시의 미소진동 검출

는 오히려 손끝의 섬세한 感覺에 의지하지 않을 수 없기 때문에 그것은 대단히 중요한 존재다. 그리고 形狀이나 굵기나 무른 정도, 粗密 등, 대상물의 物理的 性質을 아는 데도 觸覺은 필요하다.

이러한 觸覺은 손가락과 對象物 간의 접촉에 의한 것으로서 보다 많은 觸覺情報를 얻기 위해서도 넓은 면적에 고르게 高密度로 分布하는 것이 좋다. 또 人間の 피부처럼 부드럽고 變形性이 풍부한 손은 物体에 접촉하는 영역이 많고 많은 物体를 단단히 보지할 수 있다. 따라서 로봇의 손도 이러한 條件을 겸비한 것이 바람직하고 이 손에 부착하는 觸覺도 變形性이 풍부한 것이 좋다. 로봇에 사용하는 觸覺으로서 필요한

條件은 이 밖에 여러가지 있고 이것들은 다음과 같이 정리된다.

- ① 小形·輕量일 것.
 - ② 再現性이 있고 信賴性이 높을 것
 - ③ 高密度 實裝이 가능할 것
 - ④ 감도가 높고 큰 힘에 대해 특성에 변화를 가져오지 않을 것
 - ⑤ 變形性이 풍부할 것
 - ⑥ 진동이나 가속도의 영향을 받지 않을 것
 - ⑦ 손의 자세나 운동의 영향을 받지 않을 것
 - ⑧ 作業에 견딜 수 있는 強度를 가질 것
- ⑥이나 ⑦은 로봇이 복잡한 자세로 운동하는 것을 생각하면 당연한 일이다. 이와같이 觸覺에는 아주 많은 조건이 요구된다.



〈그림 5·2〉各種 接觸覺 센서

- | | |
|-----------|----------------|
| 1. 導電性고무 | 8. 炭素를 포함한 스펀지 |
| 2. 金屬 | 9. 스펀지 고무 |
| 3. 絶緣體 | 10. 우레탄 폼 |
| 4. 스펀지 고무 | 11. 베리움 靑銅箔 |
| 5. 고무 | 12. 基板 |
| 6. 金屬箔 | 13. 리드線 |
| 7. 炭素纖維 | |

이하, 觸覺 중 代表的인 감각으로서 接觸覺, 壓覺, 力覺, 슬립覺, 電氣覺을 들어서 각각의 경우에 사용되는 觸覺 센서의 예를 들면서 촉각의 現狀에 대해 설명한다. 이 외에도 촉각에 속하는 感覺에는 粗密覺, 경도, 유연覺, 生體的인 冷溫覺, 痛覺 등 수많은 감각이 있고 이런 것은 보다 고도한 感覺으로서 중요하지만 여기서는 생략한다.

(1) 接觸覺

접촉각의 代表的인 센서를 그림 5·2에 든다. (a)는 平板 위에 많은 點의 온-오프 센서가 붙은 판이 부착된 것이다. 이 센서는 통상은 온이지만 物체에 접촉하면 스프링이 오그라들고 상하 판 사이의 전기적 도통이 끊겨서 오프가 된다. 소자의 간격은 15mm이다.

(b)는 스펀지에 炭素를 포함시킨 感壓 抵抗力을 사용한 센서로서 개개의 素子は 円筒狀이다. 상하에 電極이 있고 소자의 주위는 스펀지로 둘러싸여 있다. 이 觸覺의 동작원리는 素子에 壓力이 걸렸을 때 전극 간격이 감소하며, 그 결과 電極 간 저항값이 변화하는 것을 이용한 것이다. 素子 自体 스펀지狀이지만 炭소가 포함되어 있어 外壓이 없어졌을 때의 復元力이 작다. 그래서 素子の 주위를 탄 스펀지로 둘러쌌다. 이 觸覺은 각 素子の 전기적 특성에 난조가 없도록 제작하면 애널로그 신호를 꺼낼 수 있다는 특징이 있다. 素子 1개의 지름은 3mm이고, 소자간격은 세로 가로 모두 4mm이다. 4행 5열로 배치된 多素子 觸覺은 주로 把握物체의 현상 인식에 이용되고 있다.

(c)는 感壓 導電 고무를 사용한 촉각의 구조이다. 感壓 고무를 사용한 촉각은 다른 素子에 비해 조자를 얇게 할 수 있고 그 속에 高密度인 촉각 센서를 설치할 수 있다. 또 素子 자체에 彈力이 있고 핸들링 物체에 상처를 내지 않고 소자 제작과 취급이 쉽다는 것 등 때문에 실용상·實裝上 잇점이 많다. 그러나 導電 고무의 특성으로서 히스테리시스나 응답 지연이 있고 또

접촉 저항의 차이가 크다는 것 등 때문에 實用化에는 더욱 연구가 있어야 한다.

(d)는 高密度 觸覺의 實裝을 가능하게 한 촉각 소자다. 이 동작 원리는 接點과 導電性이 풍부한 黑鉛化 炭素紙의 사이에 간격을 만들고 外力을 가했을 때에 炭소 섬유지와 우레탄 폼이 그림처럼 變形하고 접점과 炭소 섬유지의 사이가 도통 상태로 되는 것을 이용한 것이다. 觸覺의 복원력은 彈性과 絶緣성인 풍부한 스펀지體인 우레탄 폼으로 만들어진다. 이 촉각은 아주 작은 힘으로 동작하고 고밀도의 實裝이 가능하며(試作한 촉각의 素子 간격은 세로 가로 4mm이고 8행 14열로 소자가 배치되어 있다), 振動에 강하고 또 박형으로 경량이기 때문에 로봇에의 裝着이 쉽고 曲面에의 裝着도 가능하다는 등 많은 우수한 점이 있다.

(e)~(i)는 스탠포드 研究所에서 개발된 導電性 고무를 사용한 接觸覺 센서이다. 이것은 이제까지와 동일하게 2개 電極의 접촉을 이용하고 있는 것은 변함이 없지만 (f)의 觸覺은 昆虫이나 甲殼類의 촉각을 연상시키는 突起가 있어, 이 突起에 物체가 접촉하면 이것이 변형하여 絶緣체를 사이에 두는 상하의 금속이 導通하는 구조로 되어 있는 이제까지에 없던 독특한 것이다.

(j)는 觸覺을 손가락에 붙여서 실제로 作業을 할 때 촉각의 접촉면에 수직으로 작용하는 힘은 물론, 面に 平行으로 작용하는 어긋난 힘에 대해서도 충분히 견딜 수 있게 하면서 동시에 觸覺의 접촉압 感度を 높이는 데에 주안을 두어 개발된 것이다.

베리륨 靑銅箔으로 指表面을 덮도록 하고 이것과 絶緣된 指本体 또는 指本体와 금속과의 사이의 導通으로 접촉각이 檢出된다.

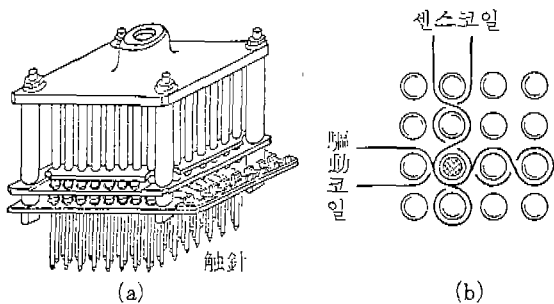
이 觸覺은 箔의 두께에 따라 接觸壓의 感度を 자유로 바꿀 수 있다. 예를 들면 0.02mm 두께인 箔으로 10~20g의 感度인 것이 만들어진다. 영역을 세밀하게 분할해서 접촉각을 검출하는 것은 곤란하지만 이 觸覺은 구조가 대단히 간단하고 사람의 피부처럼 接觸面 중에서 不感 領域이

없는 것이 특징이다.

이상 接觸覺 센서의 대부분은 導電 領域과 絶緣 領域이 層狀으로 겹쳐진 것으로서 접촉부는 面으로 構成된다. 한편, 접촉부를 點으로 한 센서가 있다. 이것은 손가락을 개폐하는 방향에 일정한 양 만큼 자유로 움직일 수 있는 바늘을 사용하고 바늘의 變位량을 2 値化해서 接觸覺을 얻는다. 평행으로 움직이는 左右 2개 손가락이 닫히는 觸은 포텐서 미터로 檢出할 수 있게 되어 있고 센서가 동작했을 때의 손가락 位置로 物体의 존재 위치가 결정된다. 160개의 觸針(한쪽 손가락에 8×10개)에서 얻을 수 있는 接觸 情報는 物体의 形狀 認識에 사용된다.

Heginbotham은 이 인식법을 더욱 발전시켜 部品의 同定에 사용할 것을 검토하여 그림 5·3 (a)에 든 센서를 개발했다. 이것은 8행 8열의 觸針으로 이루어지고 각 觸針에는 구동 코일과 센스 코일이 쌍으로 감겨져 있다. 그림 5·3 (b)는 센서 어레이에 감기는 양 코일의 모습이다. 개개 센서는 강철의 핀, 플라스틱의 통, 핀에 復元力을 주기 위한 磷靑銅 스프링으로 구성된다. 이 센서의 動作은 핀이 物体에 접촉해서 變位했을 때 핀의 밑에 붙은 磁性체가 이것과 함께 움직이고 이것이 2개 코일 사이의 相互 結合係數를 세게 하고 센스 코일에 電壓을 발생시키는 原理에 기초한다.

즉 驅動 코일에 인가된 變流 電壓에 의해 센스 코일에 전압이 유기된다. 따라서 센스하는 電壓은 핀의 變位와 함께 증대한다. 그리고 센스 코일에 유기하는 電壓의 精密한 캐리레이션이나 소프트웨어에 의한 補正을 함으로써 1mm 정도의 變位로 接觸의 온-오프 정보를 얻을 수도 있다. 8×8 개의 센서의 온-오프 情報는 구동 코일과 센스 코일을 스캔함으로써 얻게 된다. 이 센서는 觸針의 자밍(막혀서 사용할 수 없게 되는 것)이나 渦電流의 발생이라는 큰 문제를 안고 있다. 그래서 有機 유리를 플라스틱 통 대신에 사용해서 마찰력을 작게 하거나 통을 핀의 軸方向으로 가늘고 길게 하여서 渦電流를



〈그림 5·3〉 接觸覺 센서

적게 하는 對策이 생각되고 있다.

이밖에 접촉각 센서에는 마이크로 스위치가 사용되는데, 이 스위치는 동작의 信賴性이 높고 크기나 무게의 制限이 없는 곳에는 대단히 有用하다. 그러나 구조나 동작에서 사람을 指向한 로봇이나 사람과 같이 柔軟性이 풍부한 고도한 핸들링 機能을 가진 로봇을 대상으로 해서 이제까지 곤란했던 作業도 사람에 대신해서 로봇에게 시키려고 했을 때는 마이크로 스위치에는 限界가 있고 高密度이고 小形으로 가볍게 動作하는 센서가 필요해진다. 이 필요성은 義手 分野에서도 같을 것이다. 이런 의미로도 알의 觸覺 센서는 더욱 취급하기 쉽고 信賴性이 높은 것으로 연구되기를 바란다.

또한 接觸覺 센서에는 電氣接點을 사용하는 외에 공기식이나 자기식, 기타 각종의 것이 있다. 이런 센서는 對象物이 한정되는 등 특수한 용도에 효과적이지만 일반적으로 크기나 가격, 취급의 용이성 등의 點에서 電氣式보다 뒤떨어지리라고 생각된다.

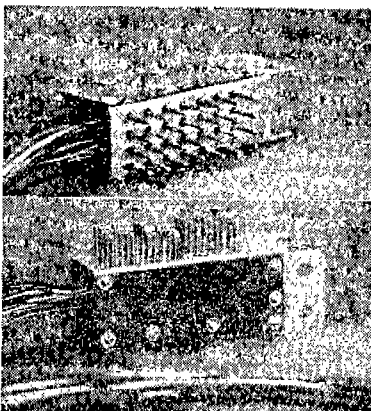
(2) 壓 覺

壓覺은 손끝이 대상물에 주는 힘 또는 손끝에 가해지는 外力의 感覺이다. 壓覺은 握力의 제어나 손의 支持力 檢출에 사용되는 것으로서 이 종류의 센서로 MPS 다이오드, 왜형 게이지 등이 具體적으로 사용되고 있다. 이런 센서는 센서 자체에 힘의 변화에 대한 위치의 변화가 거

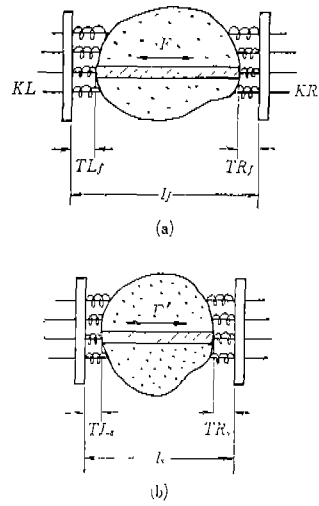
의 없기 때문에 여러 개의 센서를 有效하게 차용할 수 없지만 센서에 位置의 변화가 허용되고 이 위치량이 검출되는 경우에는 센서를 고밀도로 배치할 수 있고 이런 變位力을 이용해서 物体를 꼭 잡을 수도 있다. 여기서는 이런 圧覺센서에 대해 설명한다.

그림 5·4는 그 外視이다. 이 센서는 小形의 直線形 트리마를 改造하여 接觸子에 彈性 係數 120/9 [g/cm]인 코일 스프링을 붙여서 復元力을 갖게 한 것이다. 1개의 센서는 10mm의 有效 스트로크가 있고 그 범위 내에서 힘의 변화를 法則에 따른 길이의 變位로서 검출한다. 圧覺 센서의 出力은 接觸覺 센서와 다르고 出力信號는 아날로그값이다. 손가락의 한쪽에는 6mm × 8mm인 면적에 1개의 비율로 28개 (4행 7열)가 붙어 있다. 左右 合計로 센서는 56개가 되고 이것을 A/D 컨버터 4채널을 사용하여 고속 멀티플렉서로 변환하면서 계산기에 讀入한다.

그림 5·5는 物体를 잡은 손가락의 상태이다. (b)는 (a)의 상태에서 손가락을 微小幅 歪은 상태를 표시한다. 그림 중, (a)의 斜線部分의 壓力 F 는 무부하시와 把握時의 좌우 스프링 길이를 TL_0 , TR_0 , TL_f , TR_f , 좌우 스프링의 스프링 定數를 KL , KR 라고 하면 다음 식으로 주어진다.



〈그림 5·4〉 圧覺 센서의 外觀



〈그림 5·5〉 圧覺 센서

$$F = KR \cdot (TR_0 - TR_f) \text{ 또는 } KL(TL_0 - TL_f) \quad (5.1)$$

손가락 전체로 받는 壓力은 이와같은 힘을 한 쪽 손가락에 붙어 있는 모든 센서에 대해 더하면 구할 수 있다. 이 종류의 觸覺에 의하면 物体의 形狀 認識이나 硬度의 評價도 가능하다. 즉 서로 이웃인 센서의 位置 變化의 관계에 따라서 物体의 幾何學的 形狀이 판명하고 또 다음 식에 따라서 物体의 彈性率(K_0)이 계산된다. 단 (a)의 斜線部分이 (b)에서 받는 壓力을 F' , 같은 위치에 관한 左右 스프링의 길이를 TL_s , TR_s , (a)와 (b)의 손가락 기관 사이의 거리를 L_f , L_s 로 한다.

$$\begin{aligned} F' - F &= KR(TR_f - TR_s) \\ &= K_0 \{ (l_f - TR_f - TL_f) - (l_s - TR_s - TL_s) \} \end{aligned} \quad (5.2)$$

따라서

$$\begin{aligned} K_0 &= \frac{\Delta TR \cdot KR}{\Delta l - \Delta TR - \Delta TL} \text{ 또는} \\ &= \frac{\Delta TL \cdot KL}{\Delta l - \Delta TR - \Delta TL} \end{aligned} \quad (5.3)$$

단

$$\left(\begin{array}{l} F, F' : \text{ 힘 } \Delta TR = TR_f - TR_s \\ \Delta l = l_f - l_s \quad \Delta TL = TL_f - TL_s \end{array} \right)$$