

産業用 로봇과 制御技術의 現況과 展望

李 奉 珍

韓國科技院 精密機械技術室 (工博)

로봇에는 여러가지 種類가 있다.

産業用 로봇을 限定하더라도 시퀀스型 로봇에서 부터 高級型 로봇이라 불리는 플레이백型 로봇, 그리고 機械의 組立등을 맡아서 하는 知能 로봇에 이르기 까지 여러 種類의 로봇이 實用化 되어 있다. 따라서 이들의 制御方式도 다 다르다. 産業用 로봇의 現況을 살피고 그 制御技術의 現況과 將來의 制御技術의 方向을 展望하여 보기로 한다.

1. 産業用 로봇

1. 産業用 로봇의 定義

산업용 로봇에 대한 지금의 명확한 定義는 없다. 일반적으로 「自由도가 높고, 복잡한 동작을 할 수 있는 高機能의 機械」든가 「인간의 손이나 팔과 같은 動作機能을 갖고 있는 기계, 또는 感覺機能과 認識機能을 갖추고서 자율적으로 행동할 수 있는 기계」라고 말해지고 있다. 요컨대 공장에서 일하는 인간의 손이나 팔에 매우 유사한 기능을 갖춘 自動化 機械라고 말할 수 있다.

한마디로 산업용 로봇이라고 말해도 다양하다. 入力情報·敎示 및 動作形態로부터 분류한 1979년 2월 1일 制定의 JIS(日本工業規格)-B-0134-1979에 의하면 다음과 같다.

메뉴얼·머니플레이터: 인간이 조작하는 머니플레이터.

固定 시퀀스·로봇: 미리 設定된 순서와 조건 및 위치에 따라서 동작의 각 단계를 차례로 진행시켜 가는 머니플레이터로서, 설정 조건의 변경이 容易하지 못한 것.

可變 시퀀스·로봇: 미리 設定된 순서와 조건 및 위치에 따라서 동작의 각 단계를 진행시켜 가는 머니플레이터로서, 설정 조건의 변경이 容易한 것.

플레이·백·로봇: 미리 인간이 머니플레이터를

움직여서 敎示하는 것에 따라, 그 작업의 순서, 위치 및 그밖의 情報를 기억시키고 그것을 필요에 의해서 읽어내는 것에 따라 그 작업을 행할 수 있는 머니플레이터.

數値制御 로봇: 순서, 위치 및 그밖의 情報를 數値에 의해 지령된 작업을 행할 수 있는 머니플레이터, 예를 들면 穿孔紙 테이프, 카드와 디지털 스위치 등에 의한 것.

知能 로봇: 감각 기능, 인식 기능에 의한 行動決定이 가능한 로봇.

여기에서 말하는 머니플레이터라는 것은 물건을 잡거나 조작하는 인간의 팔에 유사한 기계를 말한다. 산업용 로봇에는 인간이 원격 조작하는 簡易型으로부터, 인간과 같은 視覺과 觸覺을 갖추고 어느 정도의 판단 기능을 가진 知能 로봇에 이르기까지 여러 종류가 있다.

현재 産業一線에서 활약하고 있는 産業用 로봇을 간단히 소개해 보기로 한다.

1) 스폿트 溶接 로봇

10년전부터 자동차 메이커가 채용하기 시작했다. 스폿트 용접은 2개의 금속판을 重合시켜, 溶接銃에 붙은 丸棒 모양의 전극으로는 加壓하면서 전류를 흐르게 하고, 그때에 발생하는 열로써 금속을 용해, 接合하는 방법이다. 이 용접총을 로봇의 손머리 부분에 부착시켜 작업을 자동화시킬 목적으로 사용한다.

일반적으로 자동차의 차체는 300~400개의 프레스 成型鋼板으로 만들어져 있어서, 이러한 溶接點이 1台的 자동차에 3000~4000個가 있다. 종래에는 사람이 5kg이나 되는 용접총을 조작하고 있으니, 이것은 대단한 重노동이었다. 이것을 日本의 자동차 메이커가 세계 처음으로 로봇화 시킨 것이다. 日産 自動車를 시작으로 東洋工業, 三菱自動車工業 등이 그 뒤를 따

라 도입하고 있다.

2) 아아크 용접 로봇

아아크 용접 로봇은 스폿트 용접 로봇보다 매우 높은 精度와 信賴性이 要求된다. 용접 로봇중에서도 高級에 屬한다.

1981년에 본격적으로 出現된 것으로써 現在는 被作業物의 着脱을 사람에게 依存하고 있으나, 머지않아 로봇 스스로가 被作業物의 着脱을 하게 될 것이다.

이와 같이 되면 아아크 용접 工場이 完全無人化 工場이 實現되는데, 그날이 멀지 않은 것 같다.

3) 塗装 로봇

最終 製品의 品質을 左右하는 것이므로 運動의 制御에 있어서도 精度를 要하게 된다. 現在 位置制御와 姿勢制御, 作業情報를 時間 情報와 같이 기억시켜 運轉(再生)時에는 그 敎示 內容을 完全히 再現시키고 있다. 機構는 比較的 多關節型이며 앞으로 더욱 플렉시블한 손목 構造와 制御, 簡便한 敎示方法과 再生 그리고 加工物의 位置 決定 精度를 높이기 爲하여 손끝에 視覺機能의 具備등이 重要研究 課題로 되고 있다.

4) 핸들링 로봇

공작기계등에 대상 가공물을 붙였다 떼었다하는 로봇을 말한다. 이 분야는 1980년 가을부터 꽃피기 시작한 시장이나, 「80年代의 有望製品 중의 하나」라고 해서 新規參入하는 기업이 계속 늘고 있다. 最先發의 富士通 파나올 뒤쫓아, 日本에선 山武 하비웰, 池貝鐵工, 大隈鐵工所, 富士電機製造, 神鋼電機 등 뒤를 쫓고 있다.

우리 나라도 1980년에 韓國科學技術院·精密機械技術 센터에 의해서 開發되어 있다.

이외에 핸들링용에는 플라스틱 成型機와 프레스加工쪽이 있다. 鑄造, 鍛造, 熱處理炉 앞의 各 作業로봇도 인간을 가혹한 노동으로부터 해방시키는데 도움을 주고 있다.

이 種類의 로봇은 FMS의 主役이 되고 있다.

5) 搬送 로봇

인간이 로봇의 팔을 움직여서 重量物을 운반하는 것이나, 벨런스 機構가 일을 하여 無重量 狀態로 되기 때문에 상당히 무거운 것일지라도 人力로 간단히 움직일 수 있다. 이러한 기계를 마이크로컴퓨터로 제어하여 自動化한 로봇으로도 가능했다.

공장의 가운데를 돌아서 素材나 半製品등을 운반하기도 하고, 창고로부터 부품과 제품등을 꺼내고 넣기도 하는 “로봇·카아트(台車)”가 있다.

現在 이 種類의 로봇은 리모트 콘트롤로 하는 것과 셀프 콘트롤로 定路를 배회하는 것 등이나, 앞으로 視覺機能을 完備할 날이 멀지 않은 것 같다.

6) 組立用 로봇

이것은 산업용 로봇의 중요한 상품이라 여겨진다. 이 분야의 最先發은 美國의 유니메이션社로서 多關節型 「퓨마」를 세계에서 처음으로 판매하기 시작했다. 日本에서는 유니메이션社와 제휴하고 있는 川崎重工業이 1982년 봄부터 이것을 國産化했다. 파낙은 1981년 9월에 기계 부품의 조립용 로봇「S시리즈」를 개발했다. 自社の 모우터 工場에 이 로봇을 大量導入함과 동시에 광범위하게 외판을 시도하고 있다. 한편 山梨大學의 牧野洋教授가 개발한 「스카라·로봇」를 三協精機製作所, 日東精工, 펜넬社, 日本電氣 등 各社가 일제히 상품화를 시도했다. 이것들은 비교적 가격이 싼 普及 機種으로, 요즘 급속히 需要가 증가하고 있는 것 같다.

IC등 전자 부품의 組立에는 超精密 로봇이 필요하다. 日本電氣는 磁力의 反發力을 이용한 리니어모우터를 사용하였다. 直交座標型으로 位置 決定 精度가 1,000分の 8mm로 높다. 한편 파낙社는 圓筒座標型으로 位置를 닦는 精度가 1萬分の 6mm의 超精密 로봇을 개발하였다.

이 로봇에는 인간의 눈에 상당하는 기능을 갖추고 있어서, 하이브리드 IC(混成集積回路)랑 OA(office automation) 機器의 조립 작업을 無人化하는데에 功력을 발휘할 것이다.

日立製作所는 기술진의 총력을 기울여 組立用 로봇 개발에 착수하였다. 5年後에는 全体會社 組立生産 工程의 60% 부문에 산업용 로봇을 도입하여, 無人化 工場의 實現을 위하여 힘을 기울이고 있다.

頭腦部分에 마이크로컴퓨터를 內藏, 視覺과 觸覺을 가지고 생산 라인의 움직임에 부합해서 步行하는 知能 로봇의 完成을 목표로 하고 있다. 이러한 것들을 自社の 생산 라인에 도입시킨 후 표준화시켜 1982년 가을이라도 제품으로 판머를 시작하는 작전이다.

또 東京芝浦電氣는 1980年代 생산 혁명의 빅 카아드로 각광을 받고 있는 FMS를 全体會社的인 규모로 도입할 방침을 세웠다. 컴퓨터를 軸으로 組立用 로봇, NC 공작기계 등을 서로 조합시켜 多種 少量品을 효율적으로 생산하는 超自動化 工場을 完善한다. 三菱電機, 松下電器産業의 大電機 메이커도 뒤를 이어 知능형 조립 로봇을 핵으로 한 FMS 공장 설비에 박차를 가하고 있다.

한편 川崎重工과 유니메이션사는 이 무렵 視覺센서를 붙인 용접 로봇트를 공동 개발하였다. 더우기 今後は 視覺과 觸覺 機能을 갖춘 지능형 조립 로봇트를 공동으로 개발할 계획이다. 또 파나히사는 西獨의 지멘스사와 조립용 지능 로봇트 「I시리즈」를 공동 개발중으로, 1982년 후반에 1호機를 발표할 것이다.

7) 知能 로봇트

인간과 같이 5感을 가지고 판단하는 것과 같은 기능을 갖춘 로봇트의 總稱을 말한다. 이미 용접 로봇트 등으로써 그 선두적인 상품이 등장하고 있으나, 이제부터는 組立用을 중심으로한 세계적인 규모로 개발 경쟁이 격화되어 가는 추세이다. 그 이용 분야도 공장으로부터 오피스로, 더 나아가 서어비스業등의 3次産業까지 이용 분야는 확대되어 갈 것이다.

이때에는 세계 최대 컴퓨터 메이커인 IBM을 시조로 해서 미니컴퓨터의 DEC, 반도체 칩메이커인 TI(텍사스·인스트루먼트)등도 로봇트 분야에 진출할 것이다.

게다가 로봇트의 응용 범위는 끝없이 확대되어 가고 있다. 原子力 로봇트, 建設 로봇트, 炭鉱 로봇트, 海洋 로봇트, 宇宙 로봇트로 부터 家事 로봇트에 이르기까지 여러 가지 用途가 계속 늘고 있다.

II. 産業用 로봇트의 制御 方式

1. 티칭 플레이백 方式

現在, 産業의 現場에 多數 投入되고 있는 溶接 로봇트, 塗裝 로봇트, 作業 로봇트 등은 거의가 多關節形 매니플레이터이고 마이크로컴퓨터를 갖추어 있으며 制御法은 티칭 플레이백 方式에 依한다.

이 方法의 基本은, 로봇트에게 시키고 싶은 作業의 順序를 事前에 어떤 (가령, 프로그래밍 등으로) 方法으로 미리 로봇트에 敎示하는 것이다.

그 敎示 內容에는 핸드부 및 각 關節의 位置, 그들의 速度, 作業 指示, 実行 順序 등이 있다.

이중 가장 簡單한 方法은 作業자가 로봇트의 先端部에 부착된 핸들(joystick)을 손잡고 實際의 作業 順序대로 움직이면서 時刻時刻으로 變化하는 각 關節角의 位置와 速度를 기억시키는 方法일 것이다. 이와 같은 方法을 直接 敎示 方式이라고 한다. 이 方法에서는 一般的으로 位置와 作業 指示만을 敎示하고, 速度에 대해서는 적절한 값의 計算을 別途로 하고 있다. 한편, 作業 順序를 數值化해서 키 보오드를 거쳐서 로봇트에 내장된 마이크로컴퓨터에 入力시키는 方法을 間接 敎示 方式이라고 한다. 이 方法은 國內에서도 1980年

KAIST 정밀기계기술실에서 開發되었고 現在(株)産多에서 実用化되어 使用하고 있다.

上述의 티칭에 있어서는 로봇트 매니플레이터의 先端部의 움직임이 連續의일지라도 通過하여야 할 要所의 點만의 座標를 기억시킨다. 一般적으로, 點서부터 點으로 位置 決定을 PTP(point to point), 連續 經路(continuous path)에 追從시키는 것을 CP方式이라고 한다(그림1 参照). 前者는 目標點에 到着만이 要求되며, 도중의 經路는 問題가 되지 않는다. 가령 스폿 溶接 作業은 이와 같이 PTP와 溶接物에 대한 溶接 作業 指示와의 反復性으로 形成된다. 한편 아아크 溶

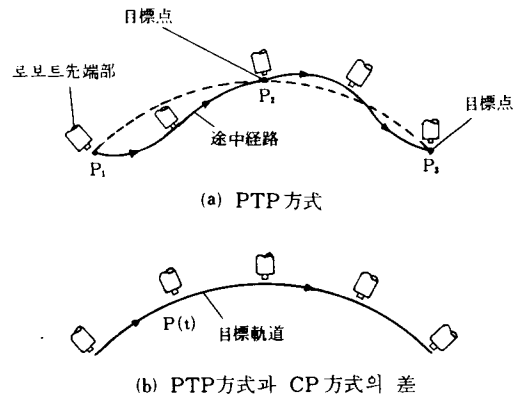


그림 1. PTP方式과 CP方式의 差

接과 塗裝에 있어서는 連續 經路에 따라서 作業이 行해 지므로, 經路의 要所의 點을 重要視하고 點間的 連續的인 經路는 計算機에 依한 補間計算에 의해 주어진다. 이 補間 機能에는, 簡單히 計算되는 直接 補間과 円弧 補間이 되는 프로그램이 갖추어져 있다. 몇 點을 攄해서 스프라인 補間을 함으로 任意的인 連續 經路를 補間하는 方法도 있다. (그림2 参照)

2. 座標 變換

多關節 매니플레이터에 대한 作業의 順序는 그 先端(핸드부)의 動作 指示로써 주어진다.

여기서 매니플레이터의 손끝(이것을 엔드 이펙터)의 直角 座標系에서의 位置(x, y, z) 및 姿勢의 오일러(Euler)角(θ, φ, ψ)을 가지고, 이것을 作業 座標라 부르면, 손끝의 動作은 이 作業 座標 x=(x, y, z, θ, φ, ψ)의 時間 推移 x(t), 또는, 指定된 座標의 系列 X1, X2, ...로 주어진다.

한편, 이들이 動作을 實現시키려면, 각 關節角 θ=(θ1, θ2, ..., θn)의 움직임을 制御함으로써 所要의 손

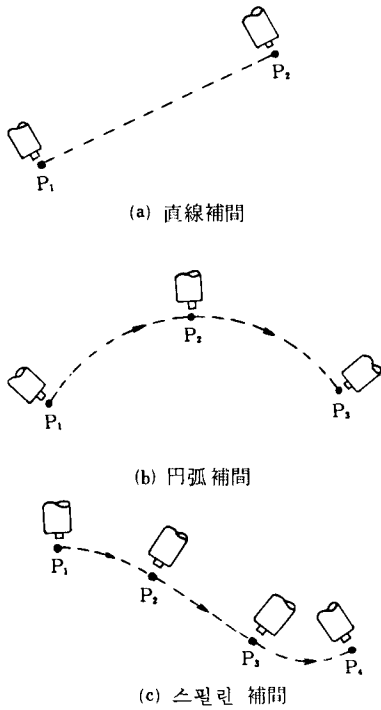


그림 2. 補間機能

을 位置의 移動 $X(t)$ 또는 X_{t-1}, X_t, \dots 에 追從이 必要하게 된다. 一般적으로 自由度(mobility) n 가 6以上의 메니플러터에서는, θ 가 주어졌을때 X 는 自然히 決定된다. (그림 3參照)

이 關係를 $X=f(\theta)$ 로 표시하면 그림 3의 경우, 손목(手首)에 妥當하는 位置가 點 $P=(x, y, z)$ 에 對應하므로, $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 를 Euler의 角 (θ, ϕ, ψ) 로 선정하면, 결국 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} x &= -(J_1 \sin \theta_1 + J_2 \sin \theta_2) \sin \theta_3 \\ y &= (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2) \cos \theta_3 \\ z &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 \\ \theta &= \theta_1, \phi = \theta_2, \psi = \theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

더구나, 핸드의 姿勢를 나타내는 오일러 角에 대해서, $X'Y'Z'$ 系와 $x'y'z'$ 系의 關係는 표 1과 같이 정리가 된다.

표 1. 그림 3의 벡터 Hx', Hy', Hz' 의 方向余弦

	X'	Y'	Z'
x'	$\cos \phi \cos \theta \cos \psi - \sin \phi \sin \psi$	$\sin \phi \cos \theta \cos \psi + \cos \phi \sin \psi$	$-\sin \theta \cos \psi$
y'	$-\cos \phi \cos \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi$	$-\sin \phi \cos \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi$	$\sin \theta \sin \psi$
z'	$\cos \phi \sin \theta$	$\sin \phi \sin \theta$	$\cos \theta$

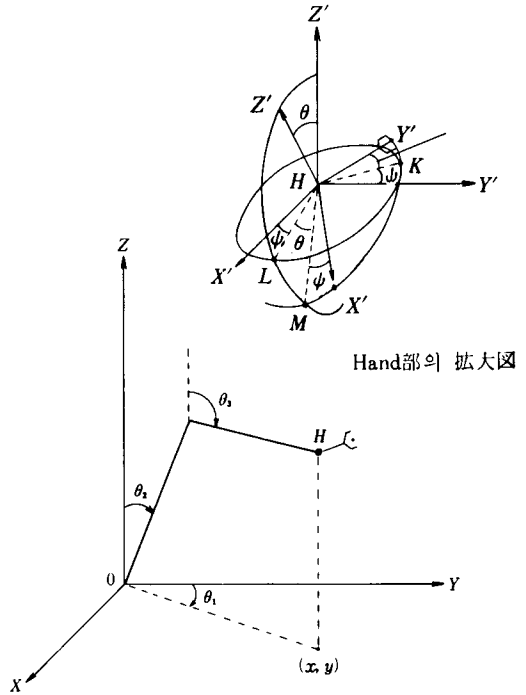


그림 3. 自由度의 多關節 메니플러터의 作業 座標 點 $H=(x, y, z)$ 가 손목에 妥當하며 여기에 自由度 3의 hand가 装着된다. Hand에 固定된 直交座標軸을 x', y', z' 라 하면 핸드의 姿勢角은 (θ, ϕ, ψ) 로 표시된다. 여기에 z' 軸, Z' 軸, 點L, M은 同一面上에 있으며 點L, K는 $X'Y'$ 平面上에, 點M, K는 $x'y'$ 平面上에 있다. 여기서는 핸드의 方向을 y' 軸으로 했다.

Arc 溶接과 塗裝 로봇의 경우, 作業 座標는 作業 個所의 끝에 취하는 것이 便利하다. 이 경우, 各關節 角 θ 가 주어졌을때의 作業 座標 $x=(x, y, z)$ 는 다음과 같이 決定된다. (그림 4參照)

$$\left. \begin{aligned} x &= -(l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3) \sin \theta_4 \\ &\quad - l_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_1 \sin \theta_4 \\ y &= (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3) \cos \theta_4 \\ &\quad + l_1 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_1 \sin \theta_4) \\ z &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 \\ &\quad - l_1 \sin \theta_1 \cos \theta_4 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

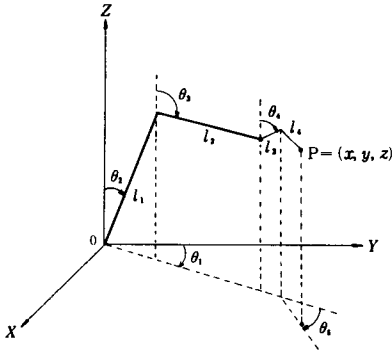


그림 4. 自由度 5의 매니플레이터의 座標系의 예

그런데, 間接 敎示 方式의 경우, 作業 座標의 目標 點 X_{1-1}, X_1, \dots 이 주어지므로, X 부터 θ 에의 逆變을 行 하여, 그와 같은 손끝의 位置·姿勢를 實現하는 關節 角 $\theta_{1-1} = f^{-1}(X_{1-1}), \theta_1 = f^{-1}(X_1), \dots$ 를 求하지 않으면 안 된다. 손끝의 位置·姿勢角과 關節角에 1對 1에 對 應할 때에는, 이 逆變換 f^{-1} 이 存在하는데, 그것을 求 하는 일은 一般적으로 어렵다. (1)式的 예에서도, θ_1 에 대해서는 簡單히 $\theta_1 = \tan^{-1}(x/y)$ 이 나오나, θ_2 와 θ_3 에 대해서는 그리 簡單하지가 않다. 또, (2)式的 예에서는 θ 의 次元과 X 의 次元이 다르며, 엄밀히 X 서부터 θ 에의 逆變換은 存在하지 않는다. 단, 作業 座標 $X = (x, y, z)$ 에 先端部의 姿勢角 $\xi = (\theta_1, \theta_2)$ 를 첨가한 座標系

$$\xi = (x, y, z, \theta_1, \theta_2) \quad (1)$$

을 새로 선택하면, ξ 서부터 θ 에의 逆變換은 存在한다. 이와 같이 η 을 슬랙變數, ξ 를 擴張시킨 作業座標라 부른다. 이와 같은 方法으로 次元을 맞추어도 實際의 變換 計算은 매우 複雜하며 마이크로컴퓨터에 依한 온라인 處理는 問題가 많다. 그러나, 逆變換을 求하는 시스템에 적합한 方法이 많이 發表되고 있으나, 詳細하게는 파울의 論文 [1~3]을 參考로 하기를 薦한다.

作業 座標 變數 ξ 와 關節 變數 θ 가 1對 1에 對 應할 때, 作業 計劃이 ξ 의 時間推移 $\dot{\xi}(t)$ 로 記述되면, 그때의 速度 變數는

$$\dot{\xi}(t) = \frac{\partial f}{\partial \theta} \dot{\theta}(t) \quad (4)$$

로 表示된다. 여기서 $\partial f / \partial \theta$ 는 그의 (ii) 要素가

$$\frac{\partial f}{\partial \theta} = \left(\frac{\partial f_i(\theta)}{\partial \theta_j} \right) \quad (5)$$

로 表示되는 제코비안 메트릭스이다. 이것이 正則일 때 ξ 와 θ 는 1對 1에 對 應해서, 逆行列도 存在해서

$$\dot{\theta} = \left(\frac{\partial f}{\partial \theta} \right)^{-1} \dot{\xi} \quad (6)$$

이 된다. 作業計劃이 連續軌道(cp)보다도 오히려 追從 速度 $\dot{\xi}$ 에 依해 記述된다면, (6)式은 그것을 實現하는 關節角의 移動速度를 나타내는 것이 된다. 關節角速度 $\dot{\theta}$ 을 (6)式에 依해 制御하는 方式을 Whitney¹⁾의 “리절브드 모션 레이트 콘트롤”이라 한다.

3. 피이드백 制御方式

上述한 Whitney 方式에서는 제코비안 메트릭스의 計算과 동시에 그 逆行列 計算을 하여야 되므로 時間도 걸리고 번거롭다. 그래서 주어진 作業 座標의 目標點에서 다음 目標點에 이르는 運動을 目標點부터의 變位 變數와 速度 變數를 각각 關節 토크에 線形 피이드백함으로써 實現하는 새로운 方法이 提議²⁾되어 있다.

지금, n 關節을 갖은 매니플레이터를 놓고 그 關節角 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ 를 一般化 座標라고 하면, 그 運動은

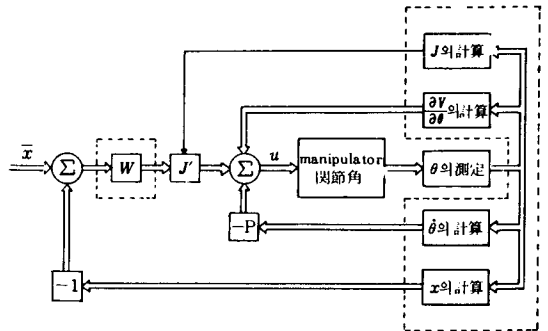


그림 5. 피이드백은 制御方式, 이것은 一種의 階層 構造를 하고 있다. 點線으로 쌓은 部分은 上位 레벨에서 大域的으로 實行하고, 다른 下位 레벨에서 局部的으로 實行된다.

$$\dot{\theta} = \frac{\partial H}{\partial P} \quad (7)$$

$$\dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial \theta} + u = -\frac{\partial T}{\partial \theta} - \frac{\partial V}{\partial \theta} + u$$

로 쓸 수 있다.

여기서, T, V, H 는 각각 매니플레이터 系의 運動에너지 포텐셜 函數 하밀턴언을 표시한다.

$$H = T + V \quad (8)$$

이다. 變數 $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ 은 θ 에 대한 一般化 運動量으로 $P_i = \partial T / \partial \dot{\theta}_i$ 로 定義된다.

運動에너지는 一般적으로

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n R_{i,i}(\theta) \dot{\theta}_i^2 \quad (9)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 行列 $R(\theta) = (R_{i,j}(\theta))$ 는 一般적으로 正定值로 假定된다. 또, $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$ 는 θ 에 対応하는 一般力이며, 이것을 自由롭게 操作을 하게 된다. 또, $\partial H / \partial P$ 와 $\partial H / \partial \theta$ 는 勾配 벡터를 나타내며 $\partial T / \partial \theta$ 와 $\partial H / \partial \theta$ 와도 같다.

다음, 作業 座標을 ξ , 그 次元은 θ 와 같으며, 지금 생각하는 位置에서 제코비안 매트릭스 $J = (\partial \xi_i / \partial \theta_j)$ 은 正則이라면, 이때, ξ 에 対応하는 一般化 運動量은

$$q = \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\xi}} \right) = (J')^{-1} R J^{-1} \dot{\xi} \quad (10)$$

이 된다.

단, 푸리에 記号(')은 轉置를 표시한다. 이 ξ, ϕ 에 대해서 正準 方程式은 (7) 式에서 부터

$$\dot{\xi} = \frac{\partial H}{\partial \phi}$$

$$\dot{\phi} = -\frac{\partial T}{\partial \xi} - \frac{\partial V}{\partial \xi} + (J')^{-1} U \quad (11)$$

로 바꾸어 쓸 수가 있다.

여기서, 拡張 作業 座標 ξ 에 대해서, 目標點 $\bar{\xi}$ (縱表示는 벡터)가 주어졌다면, 그때, 操作 토오크 $U(t)$ 를 偏差 벡터 $\xi(t) - \bar{\xi}$ 의 피이드백을 主体로 하여 다음과 같이 定할 수가 있다.

$$U = \frac{\partial V}{\partial \theta} - J' W (\xi - \bar{\xi}) - J' Q \dot{\xi} \quad (12)$$

여기서 W 와 Q 는 $n \times n$ 의 적당한 正定值 行列이라고 하면, 이때, 問題는 손끝의 位置를 표시하는 $\xi(t)$ 가 目標值 $\bar{\xi}$ 에 移動해 주느냐, 하는 것이다. 지금

$$\bar{H} = T(\xi, q) + \frac{1}{2} (\xi - \bar{\xi})' W (\xi - \bar{\xi}) \quad (13)$$

라 정하고, 이것을 Manipulator의 運動 軌道에 따라서 時間 微分하면, $\partial V / \partial \theta = J \partial V / \partial \xi$ 이 됨으로

$$\frac{d}{dt} \bar{H} = -\dot{\xi}' Q \dot{\xi} \quad (14)$$

가 됨을 알 수 있다. 즉, \bar{H} 는 變數 (ξ, q) 에 대해서, Liapunov 函數의 役割을 하게 되며, 잘 알려진 La Salle의 定理를 쓰면, 狀態 空間에서 平衡點 $(\xi = \bar{\xi}, q = 0)$ 는 漸近 安定됨을 알 수 있다. 이와 같이 하여서, $t \rightarrow \infty$ 일때 $\xi(t) \rightarrow \bar{\xi}$ 됨이 표시된다.

(12) 式의 右邊 第1項은 重力의 補償項이다. 第2項이 拡張 作業 座標부터의 피이드백 項이다. 第3項은 크램핑 項에 妥当되며, $\dot{\xi}(t)$ 의 $\bar{\xi}$ 에의 収束 모양은 이 Q 의 선택에 크게 依存된다. 그리고, $\dot{\xi} = J \dot{\theta}$ 의 關係가 있

으므로, $J' Q \dot{\xi} = J' Q J \dot{\theta}$ 이며, $P = J' Q J$ 를 正定值가 되도록 선택하면, 操作 토오크를

$$u = \frac{\partial V}{\partial \theta} - J' W (\xi - \bar{\xi}) - P \dot{\theta} \quad (15)$$

로 할 수가 있다. 一般적으로 θ 는 항상 測定된다고 생각되므로 (14) 式 보다 (15) 式이 実裝化에는 더욱 적합하다. 以上の 結果는 拡張 作業 座標에 대해서 成立했는데, 作業座標가 손끝의 位置 $X = (x, y, z)$ 일때 또, 위와 같이 해서

$$u = \frac{\partial V}{\partial \theta} - J W (x - \bar{x}) - P \dot{\theta} \quad (16)$$

라 할 수가 있으므로, 여기서 W 는 3×3 의 正定值 行列이며, J 는 $3 \times n$ 의 제코비안 매트릭스이다. 이 경우도 目標點에 向한 運動의 漸近 安定性이 증명된다. (16) 式에 의한 피이드백 制御方式은 그림 5와 같이 표시 할 수 있다.

4. 適応 制御方式

머니플레이터 物理定數는, 姿勢 变化和 作業 환경의 變動에 의해서 變한다. 가령, 핸드부가 物件을 잡으면, 質量이 變하며 慣性 모멘트가 变化하여 結局, 運動方程式이 달라진다. 또, 姿勢의 變動으로 方程式의 係數 行列중의 慣性 모멘트가 變해서 이 경우도 方程式이 變한다. 이와 같은 경우, 作業變數間의 動物인 간섭項을 未知로 해서, 그것을 補償하기 위한 피이드백의 제인 行列을 未知로 하여, 그 제인 行列을 같이 고정하는데 妥當한 파라메터 調整則을 유도, 目標軌道에의 追從性을 보증할 수가 있다. 이것은 一種의 모델 規範 適応 制御인 것이다. 그림 6에 그 適応 制御

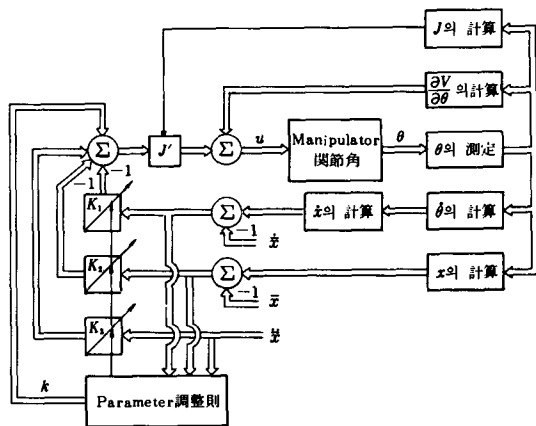


그림 6. 머니플레이터

시스템의 概略을 표시해 둔다. 作業 目標는 連續 軌道 $x(t)$ 로 주어지며, 그 速度 成分 $\dot{x}(t)$, 加速度 成分 \ddot{x} , 行列 K_1, K_2, K_3 와 벡터 K 는 파라메터 調整則에 의해 調節되는데^{[1]-[3]}, 操作 토오크는 다음과 같이 주어진다.

$$u = \frac{\partial V}{\partial \theta} + J^T \{-K_1(\dot{x}-\dot{\bar{x}}) - K_2(x-\bar{x}) + K_3\ddot{x} + k\} \quad (17)$$

이 方程式의 有効性은 計算機 시뮬레이션에서는 確認이^{[7]-[9]} 되어 있으나 實際의 머니플레이터에 依한 實驗 報告는 아직 없다. 이의 各 軸을 個別的으로 適應 制御하는 方法도 提案^[10]되어 있다.

以上과 같이 産業用 로봇에 대한 制御方式을 紹介 하였으나 로봇 制御의 柔軟性과 正確, 적응성 등을 考慮한 適應 制御 方式이 앞으로의 産業用 로봇 制御의 本領이 될 것 같다.

参 考 文 献

[1] Richard P. Paul, *Robot Manipulator: Mathematics, Programming and Control*. The MIT Press, 1981.

[2] Richard P. Paul, B. Shimano, And G. E. Mayer, "Kinematic control equations for simple manipulators"; *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-11, no. 6, pp. 449-445, June 1981.

[3] R. P. Paul, *Modeling, Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm*. Stanford University, AIM 177, 1972.

[4] D. E. Whitney, "The mathematics of coordinated control of prosthetic arms and manipulators", *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, pp. 303-309, Dec. 1972.

[5] M. Takegaki and S. Arimoto, A new feedback method for dynamic control of manipulator", *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 103, pp. 119-125, June 1981.

[6] S. Dobowsky and D. T. Desforges, "The application of model reference adaptive control to robotic manipulators", *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 101, pp. 193-200, 1979.

[7] M. Takegaki and S. Arimoto, "An adaptive trajectory control of manipulators", *International Journal of Control*, vol. 34, no. 2, pp. 219-230, 1981.

[8] S. Arimoto and M. Takegaki, "An adaptive method for trajectory control of manipulators", *Proc. of the 8th IFAC*, vol. XIV, pp. 72-77, 1981.

[9] 竹垣, 有本, マニピコレータ의 adaptive control 計測自動制御学会論集, vol. 17, no. 4, pp. 467-472, 1981.

[10] 李奉珍, 電子科学, vol. 24, no. 7, 1982.

◆ 用 語 用 說 ◆

Serial:

1. Pertaining to the sequential performance of two or more activities in a single device.
2. Pertaining to the sequential or consecutive occurrence of two or more related activities in a single device or channel.
3. Pertaining to the sequential processing of the individual part of the whole, such as the bits of a character, or the characters of a word using the same facilities for successive parts. Contrast with parallel.

Service Terminal: The plug supplied by the Common Carrier into which the modem plugs (Series 1000 channels).

Simplex: A circuit capable of transmission in one direction only. Contrast with half duplex, full duplex.

Bootstrap: A technique or device designed to bring itself into a desired state by means of its own action, e.g., a machine routine whose first few instructions are sufficient to bring the rest of itself into the computer from an input device.