

〈論 文〉

로봇트를 이용한 힘제어에서의 기하학적 안정성에 관한 해석

이 병 주*

(1994년 1월 11일 접수)

Analysis of Geometric Stability in Robot Force Control

Byung-Ju Yi

Key Words : Geometric Stability(기하학적 안정성), Force Control(힘제어), Antagonistic Stiffness(상반 강성), Stiffness Control(강성제어), Redundant Manipulator(여유 자유도 매니플레이터)

Abstract

Force control of robotic mechanisms continues to be a challenging area. Previous implementation have seldom produced satisfactory results, and researchers in the past have experienced significant instability problems associated with their force controllers. In this study, a new stability factor in force control will be pointed out. When a manipulator is constrained to an environment (force-controlled), geometric instability due to the relationship between the manipulator configuration and the force-controlled direction is shown to be a significant factor in overall system stability. This exploratory study points out a rather intuitive, geometrically based stability factor in terms of an effective system stiffness and analyzes the phenomenon both analytically and graphically. Also, a stiffness control algorithm using the kinematic redundancy of a kinematically redundant manipulator is proposed to improve the overall stability in force control.

1. 서 론

현대 산업용 로봇트의 적용은 스프레이페인팅, 점용접, 그리고 간단한 운반과 같은 정밀도가 작은 비접촉성 일들에 국한되어 왔다. 이것은 로봇트 시스템 그리고 주위환경의 불완전한 모델링으로 인하여 실제 작업에 있어서 충분하리 만큼 높은 정밀도를 보장하기는 일반적으로 어렵기 때문이다. 더욱이 힘제어는 위치를 계획하고 제어해 주는 것 뿐만 아니라, 추가적으로 힘을 계획하고 제어해 주어야 하기 때문에 한층 더 일반적인 형태의 궤도제어라고 간주된다. 따라서, 힘제어는 많은 연구가

진행되어 온 반면에, 만족할 만한 결과들을 얻지 못하였고,⁽¹⁸⁾ 심도있는 이론들의 개발과 실제 산업에 적용하는데 있어서 많은 일들을 남겨두고 있다.^(16,7,12-14)

모든 제어 시스템에서의 필수적인 것은 안전성에 관한 연구이다. 힘제어에서 발생하는 불안정성의 한 가지 이유로서는, 힘제어는 아주 큰 게인(gain)을 지니는 위치 피드백과 동일한 것으로 보이기 때문에, 또는 센서와 액추에이터를 떨어뜨려 놓는 데서 발생하는(non-collection) 추가적인 관성힘 때문이다. 이러한 형태의 불안정성을 문헌에서는 "동역학적 불안정성(dynamic instability)"이라고 한다.^(2,3) 두번째 종류의 불안정성은 "기구학적 불안정성(kinematic instability)"이라고 불리우는데,^(2,4) 이것은 피드백 경로에서 역기구학적 변환(inverse

*정회원, 한국기술교육대학 제어기체공학과

kinematic)으로 생기는 현상인데 기구학적 비연속성과는 반드시 일치하지는 않는다. 세번째 형태의 불안정성(kinematic instability)은 힘과 명령간의 양립할 수 없는 성질때문에 일어난다.⁽¹⁶⁾ 네번째로는 내력간에 또는 외력과 힘의 평형을 이루고 있는 시스템에서 매니플레이터의 형체(configuration) 또는 힘의 방향에 따른 안정성에 관한 것인데,⁽¹⁹⁾ 본 논문에서는 특별히 직렬형 매니플레이터를 이용한 힘제어에 있어서 기하학적 안정성 요소에 관한 심도있는 분석을 수행하고자 한다.

많은 로봇트 제어 알고리즘은 사람의 경험에 비추어 개발되어 왔음을 알 수 있다. 예를 들면, 막대를 구멍에 끼우는 방법, 쓰기 위해 연필을 다루는 방법 등이다. 이와 마찬가지로 로봇트가 작업환경과 직접 접촉하여 일할 때, 어떻게 움직여야 하는가에 대한 새로운 알고리즘들이 개발되고 적용될 수 있다. 다시 말해서, 하나의 작업에 있어서 로봇트는 여러가지 형체(configuration)를 가질 수 있으며, 또한 힘제어하는 방향도 여러 가지의 선택이 있을 수 있다. 예를 들어서, 사람이 어느 가공 작업을 하고 있을 때, 일상적으로 공구를 잡은 손을 뻗히고 팔을 밑으로 내린 상태에서 자신의 몸쪽으로 끌어당기면서 작업을 한다. 그러나, 만일 다른 방식으로 작업을 한다면 어떠한 현상이 일어날까 하는 의문을 가질 수 있다. 이와 같은 사람의 판단은 경험에 의하여 얻어지지만, 본 논문에서는 이러한 결정들을 이해하기에 도움이 되는 하나의 해석적인 방식을 소개하며 이것을 실제 로봇트를 이용한 힘제어에 활용하고자 한다.

기하학적 안정성을 설명하기 위하여 적용된 주된 방법은 상반 강성효과(antagonistic stiffness effect)이다. 이 강성효과는 시스템 액추에이터와 제어되는 외력(중력 또는 로봇트 끝에 작용된 힘)간의 서로 싸우는 상반작용에 의하여 발생한다. 그동안 많은 논문에서 발표된 것 같이 불안정성을 유발하는 요소들이 많이 있지만, 피드백 하에서의 힘제어 작업에서도 채터링(chattering)과 stick-slip현상과 같은 국부적으로 불안정한 현상들은 본 논문에서 설명되는 안정성 논의에 근거하여 부분적으로 설명되어진다.

이 논문에서는 추가적으로 힘제어에 있어서 안정성을 향상시키기 위하여 여유자유도 시스템의 여유자유도를 이용하는 강성제어 알고리즘이 고려된다. 예를 들어서, 평면형 3자유도 시스템에서 로봇트는

작업공간에서 제어될 두 방향의 힘(x 그리고 y 방향)들이 있기 때문에 한개의 여유자유도를 가진다. 따라서, 로봇트가 작업환경에 접촉할 때 로봇트에 작용된 힘의 방향에 대하여, 여유자유도를 이용한 관절공간에서의 자가운동을 통하여, 향상된 안정성을 지니도록 형체를 선택해 주는 알고리즘이 제시된다.

이 논문의 순서는 다음과 같다. 먼저, 다루어지는 연구문제를 제시하고, 직렬형 로봇트 시스템의 모델링과 이에 적용되는 기구학적 용어들을 소개한다. 다음으로, 기하학적 안정성에 대한 심도있는 분석이 행하여진다. 무중력 그리고 중력상태에서, 시스템의 안정성, 매니플레이터의 형체, 그리고 힘제어되는 방향 등이 연계되어 설명되어진다. 다음으로는, 안정성을 향상시키기 위하여, 적절한 작업대의 위치와 여유자유도를 이용한 자가운동의 활용 등이 제시된다. 마지막으로 결론 및 추천의 말이 주어진다.

2. 연구 문제의 제시

로봇트 형체(configuration)가 힘제어에 있어서 안정성에 영향을 미치는가? 만일 그렇다면, 주어진 로봇트에 대하여, 어떠한 형체가 최대한으로 안정한가? 또한, 힘제어의 방향이 힘제어에 있어서 안정성에 영향을 미치는가? 다시, 만일 그렇다면, 어느 방향이 상대적으로 안정한가? 두번째 질문은 사람 손가락을 사용한 실험을 통하여 설명되어질 수 있다. 하나의 사람 손가락이 거친 작업환경에 접촉하여 일을 하고 있다고 가정을 하자. Fig. 1 그리고 Fig. 2에서 보인 바와 같이 두 가지 다른 방향으로 힘을 제어할 수 있다. 여기에서, 손가락은 피드백 하에 힘제어를 하고 있다고 가정을 한다.

이 때, Fig. 1의 경우는 통상적으로 안정된 현상을 보여 주는 반면에, Fig. 2의 경우는 일반적으로 로봇트 작업에서 관찰되어 온 채터링과 같은 불안정한 현상을 보여준다. 첫번째 질문에 대한 답은 Figs. 1, 3, 그리고 4의 서로 다른 형체들에 있어서의 안정성의 차이를 관찰함으로써 알 수 있다. Fig. 3의 형체가 가장 작은 충돌현상을 가지고 있으며, Fig. 4의 형체는 가장 좋은 안정성을 가지고 있음을 관찰할 수 있다. 3, 4절에서는 매니플레이터의 형체와 힘제어 방향에 연관된 기하학적 안정

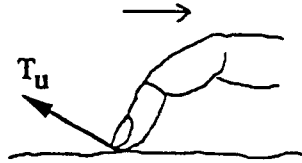


Fig. 1 Finger tip experiment 1

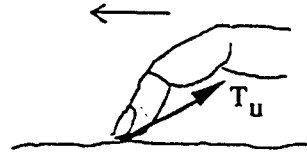


Fig. 2 Finger tip experiment 2

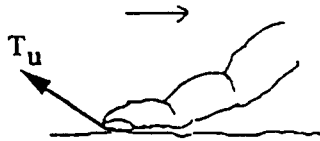


Fig. 3 Finger tip experiment 3

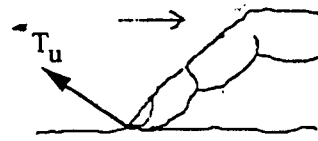


Fig. 4 Finger tip experiment 4

성에 대한 전반적인 사항들을 해석적으로 그리고 도식적으로 설명한다.

3. 직렬형 로봇의 기구학 모델링

이 절에서는, 기하학적 안정성에 관한 수학적 모델을 만드는데 필요한 고차원적 기구학 (higher-order kinematics)의 일반적인 방법론에 대하여 간략히 소개한다. M 개의 독립변수(입력) ϕ 에 대하여 P 개의 종속변수(출력) u 가 존재하면, 다음과 같은 속도 관계식이 성립한다.

$$\dot{u} = [G^y] \dot{\phi} \tag{1}$$

여기서, $[G^y]$ 는 시스템 자코비안(Jacobian) 또는 일차 기구학적 영향계수 (first-order kinematic influence coefficient) 행렬을 뜻하며

$$[G^y] = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \phi_1} & \frac{\partial u}{\partial \phi_2} & \dots & \frac{\partial u}{\partial \phi_M} \end{bmatrix} \tag{2}$$

와 같이 표시되며 각 벡터 $\frac{\partial u}{\partial \phi_i}$ 의 차원은 $P \times 1$ 이다.

위에서 소개된 일차원적 기구학 (first-order kinematics)은 일반적인 형태이지만, 다음에서 소개되는 이차원적 기구학 (second-order kinematics)은 흔하지 않은 방식인데, 비선형이고 속도에 관련된 요소들이 3차원 행렬의 형식으로 나타내어지는 방법이 도입된다. 이 행렬의 요소들은 순수하게 위치에 종속되는 이차 편미분으로 표현된다. 일반적으로, $P \times 1$ 의 차원을 가지는 가속도 벡터 \ddot{u} 는 다음과 같이 $M \times 1$ 의 차원을 가지는 ϕ 의 함수로 나타내어진다.

$$\ddot{u} = [G^y] \ddot{\phi} + \dot{\phi}^T [H^{yy}] \dot{\phi} \tag{3}$$

여기서, 이차 기구학적 영향계수(second-order kinematic influence coefficient) 행렬 $[H^{yy}]$ 는 $P \times M \times M$ 의 차원을 가지며 다음과 같이 정의된다.

$$([G^y]) \dot{\phi} = \dot{\phi}^T [H^{yy}] \dot{\phi} = \begin{bmatrix} \dot{\phi}^T [H^{yy}]_{1..} \dot{\phi} \\ \dot{\phi}^T [H^{yy}]_{2..} \dot{\phi} \\ \vdots \\ \dot{\phi}^T [H^{yy}]_{p..} \dot{\phi} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$[H^{yy}]_{i..}$ 은 $[H^{yy}]$ 의 i 번째 평면을 의미하며, 그 차원은 $M \times M$ 이다. 기존의 기구학 모델링에서는 $\dot{\phi}^T [H^{yy}]$ 대신에 $[G^y]$ 를 사용하여 왔으나, 순수하게 기하학적으로 이루어진 이차 영향계수 행렬 $[H^{yy}]$ 은 비연속성의 성질과 조건을 설명하는데,⁽⁵⁾ 그리고 이 연구에서 토론될 상반작용에 의하여 발생하는 강성효과를 정의하는데 유용하게 쓰인다.

4. 기하학적 안정성에 관한 해석

이 절에서는, 매니플레이터의 형체에 관련된 기하학적 안정성이 전체 시스템의 안정성에 하나의 중요한 요소임을 보인다. Fig. 5는 중력장 하에서 고정된 작업환경에 접촉하여 일하는 M 개의 관절을 가지고 있는 직렬형 로봇이다. 이 때, 관절 공간에서 표현된 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$[I_{\phi\phi}^*] \ddot{\phi} + \dot{\phi}^T [P_{\phi\phi}^*] \dot{\phi} = T_\phi + [G^y]^T T_u - \sum_{i=1}^M [G_i^y]^T F_i^c$$

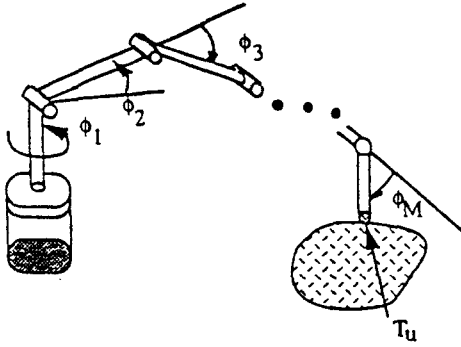


Fig. 5 Open-chain serial manipulator

여기서, $[I_{\phi\phi}^*]$ 는 관절공간에서 표현된 효과적인 관성행렬 (effective inertial matrix) 이고 $[P_{\phi\phi}^*]$ 는 관성동력 행렬 (inertial power array) 로 정의된다. 그리고, T_u 는 로봇트에 작용된 일반적인 하중벡터 이고, T_{ϕ} 는 관절에서의 액추에이터 힘, 그리고 F_{ϕ}^i 는 i 번째 링크의 질량중심에 작용된 중력을 나타낸다. $[G_{\phi}^i]$ 는 입력에 대한 i 번째 질량중심을 나타내는 자코비안이다.

시스템에 가해진 힘들이 일정하다고 가정하고 미소변위가 주어지면 식(5)는 정적 평형상태($\dot{\phi}, \ddot{\phi} = 0$)에서는 다음과 같이 정리되어 나타내어질 수 있다. (부록 1 참조)

$$[I_{\phi\phi}^*]\delta\dot{\phi} + [B_{\phi\phi}^*]\delta\dot{\phi} + [K_{\phi\phi}^*]\delta\phi = 0 \quad (6)$$

여기서, 시스템의 전체 강성행렬 $[K_{\phi\phi}^*]$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$[I_{\phi\phi}^*] = \left[[K_{\phi\phi}^*] - (-T_u)^T o [H_{\phi\phi}^u] + \sum_{i=1}^n (-F_{\phi}^i)^T o [H_{\phi\phi}^o] \right] \quad (7)$$

여기서, 'o'는 하나의 일반화된 수량의 곱 (generalized scalar product) (부록 2)을 의미하고, $[H_{\phi\phi}^o]$ 는 입력에 대한 i 번째 질량중심의 관계를 나타내는 이차 기하학적 영향계수이다. 식(7)의 첫번째 항은 순수한 관절강성 (passive joint stiffness) 과 피드백 강성의 직렬결합으로 이루어진 강성이고, 통상적으로 작은 크기를 가지고 있는 피드백 강성이 지배적이다. 두번째, 그리고 세번째 항들은 시스템 자코비안의 변위로 생기는 요소들로서 여기서는 "상반강성 (antagonistic stiffness)" 이라고 정의한다. 식(6)을 통하여 우선 일반적인 폐쇄회로 피드백 제어론 생각해 볼 수 있다. 정적 또는 준정적 (static or quasi-static) 으로 평형된 시스템에서 안정성을

보장하기 위해서는 식(6)에서 우선 각각의 임피던스행렬 (impedance matrix) 은 양의 정부호 (positive definite) 이어야 한다. 식(6)에서 $[I_{\phi\phi}^*]$ 는 항상 양의 정부호이고 국부적 PD피드백 제어이론에 근거하여 위치 피드백 행렬 (position feedback matrix) $[K_{\phi\phi}^*]$ 와 피드백 감쇠행렬 (damping matrix) $[B_{\phi\phi}^*]$ 이 양의 정부호로 정하여질 수 있다.⁽¹¹⁾ 그러나, 기존의 로봇트 매니퓰레이터의 강성모델에서는 식(7)의 나머지 두 항들이 고려되지 않았다. 이로 인하여 원하는 성능을 얻지 못하거나 또는 전체 강성행렬이 양의 정부호의 성격을 잃어서 결과적으로 불안정 상태로 되는 경우가 발생할 수 있었다. 이러한 문제점을 방지하기 위해서는 원하는 강성행렬 $[K_{\phi\phi}^*]$ 에 대하여 식(7)로부터 하나의 피드백 강성행렬 $[K_{\phi\phi}^*]$ 을 정하여 제어하는 방식이 고려되어야 한다. $[B_{\phi\phi}^*]$ 도 역시 이에 따른 조정이 필요로 된다.

한편, 개회로 안정성 (open-loop stability) 으로서 해석되는 상반강성 항들의 역할을 분석하여 본다. 위치 피드백을 고려하지 않은 상황에서는, $[K_{\phi\phi}^*]$ 는 순수하게 관절의 강성을 나타냄을 살펴볼 수 있다. 대부분의 산업용 로봇트에 있어서는, 시스템 관절들은 큰 감속비를 내기위해 기어박스를 지니고 있기 때문에 이로 인하여 매니퓰레이터 관절에서 느끼는 효과적인 관성의 힘이 크며, 또한 기어간의 많은 마찰로 인하여 시스템 관절들은 비역전성 (non-backdrivability) 을 갖는다. 이에 따라, 시스템의 각 관절들은 식(7)의 아주 큰 스프링으로 모델되기 때문에 상대적으로 나머지 상반강성을 나타내는 두 항들은 무시된다. 그러나, 시스템 관절들이 비교적 역전이 가능하거나, 또는 외력이거나 중력의 크기가 클 경우에는 이 항들의 크기는 상대적으로 증대되므로 무시할 수 없다. 더욱이 이 두 항들을 고려하지 않으면 절대적인 크기에 관계없이 전체 강성행렬의 양의 정부호임을 보장할 수 없는 경우가 발생한다. 따라서, 아주 난해한 피드백 전략이 필요시되는 어려움이 있다.⁽⁹⁾ 최근에는 정확한 힘 그리고 강성제어를 하기 위하여, 기어 박스 없이 직접 구동되는 시스템 (direct drive system) 이 제시되었다.⁽²⁾ 이러한 시스템은 완전히 역전이 가능하며 (completely backdrivable), 따라서, 식(7)의 강성모델에서는 관절자체에 의한 강성은 무시되며, 마지막 두 항의 강성이 지배적이다. 다음에서는 이 항들에 대한 해석적인 그리고 도식적인 방법을 통한 기하학적 안정성 (geometric stability) 에

대한 해석을 하고자 한다. 또한 피드백을 통한 폐루프 제어에 있어서 이 항들이 시스템의 안정성에 미치는 영향을 채터링현상과 관련하여 설명하고자 한다.

기하학적 안정성을 설명하기 위한 하나의 특정한 예로서, Fig. 6의 3자유도 직렬형 매니퓰레이터에 대하여 자세히 논의하고자 한다.

로봇의 위치는 일반적으로 다음과 같이 세 개의 식으로 표현된다.

$$x_h = L_1 C_1 + L_2 C_{1+2} + L_3 C_{1+2+3} \quad (8)$$

$$y_h = L_1 S_1 + L_2 S_{1+2} + L_3 S_{1+2+3} \quad (9)$$

$$\phi_h = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \quad (10)$$

여기서, S_{1+2+3} , C_{1+2+3} 그리고 C_{1+2} 는 각각 $\sin(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)$, $\sin(\phi_1 + \phi_2)$, $\cos(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)$, 그리고 $\cos(\phi_1 + \phi_2)$ 을 나타낸다.

각 링크의 질량중심이 링크 가운데에 위치한다고 가정하면, 질량중심의 위치는 다음과 같이 나타내어진다.

첫번째 질량중심은,

$$x_{c1} = \frac{1}{2} L_1 C_1 \quad (11)$$

$$y_{c1} = \frac{1}{2} L_1 S_1 \quad (12)$$

$$\phi_{c1} = \phi_1 \quad (13)$$

두번째 질량중심은,

$$x_{c2} = L_1 C_1 + \frac{1}{2} L_2 C_{1+2} \quad (14)$$

$$y_{c2} = L_1 S_1 + \frac{1}{2} L_2 S_{1+2} \quad (15)$$

$$\phi_{c2} = \phi_1 + \phi_2 \quad (16)$$

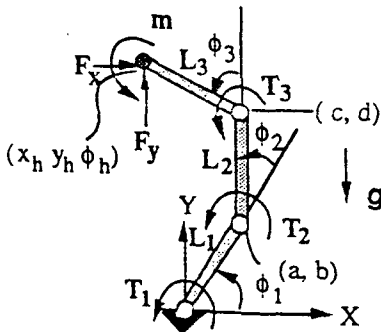


Fig. 6 3-DOF serial manipulator

세번째 질량중심은,

$$x_{c3} = L_1 C_1 + L_2 C_2 + \frac{1}{2} L_3 C_{1+2+3} \quad (17)$$

$$y_{c3} = L_1 S_1 + L_2 S_2 + \frac{1}{2} L_3 S_{1+2+3} \quad (18)$$

$$\phi_{c3} = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \quad (19)$$

와 같이 나타내어진다.

$[H_{\phi\phi}^0]$ 의 정의에 따라서, $[H_{\phi\phi}^0]$ 의 각 평면은 로보트 끝에 대하여,

$$[H_{\phi\phi}^0]_{1::} = - \begin{bmatrix} x_h & (x_h - a) & (x_h - c) \\ (x_h - a) & (x_h - a) & (x_h - c) \\ (x_h - c) & (x_h - c) & (x_h - c) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$[H_{\phi\phi}^0]_{2::} = - \begin{bmatrix} y_h & (y_h - b) & (y_h - d) \\ (y_h - b) & (y_h - b) & (y_h - d) \\ (y_h - d) & (y_h - d) & (y_h - d) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[H_{\phi\phi}^0]_{3::} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

첫번째 질량중심에 대하여,

$$[{}^1H_{\phi\phi}^c]_{1::} = \begin{bmatrix} x_{c1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[{}^1H_{\phi\phi}^c]_{2::} = \begin{bmatrix} y_{c1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$[{}^1H_{\phi\phi}^c]_{3::} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

두번째 질량중심에 대하여,

$$[{}^2H_{\phi\phi}^c]_{1::} = \begin{bmatrix} x_{c2} & (x_{c2} - a) & 0 \\ (x_{c2} - a) & (x_{c2} - a) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$[{}^2H_{\phi\phi}^c]_{2::} = \begin{bmatrix} y_{c2} & (y_{c2} - b) & 0 \\ (y_{c2} - b) & (y_{c2} - b) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$[{}^2H_{\phi\phi}^c]_{3::} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

세번째 질량중심에 대하여,

$$[{}^3H_{\phi\phi}^c]_{11} = \begin{bmatrix} x_{c3} & (x_{c3}-a) & (x_{c3}-c) \\ (x_{c3}-a) & (x_{c3}-a) & (x_{c3}-c) \\ (x_{c3}-c) & (x_{c3}-c) & (x_{c3}-c) \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$[{}^3H_{\phi\phi}^c]_{22} = \begin{bmatrix} y_{c3} & (y_{c3}-b) & (y_{c3}-d) \\ (y_{c3}-b) & (y_{c3}-b) & (y_{c3}-d) \\ (y_{c3}-d) & (y_{c3}-d) & (y_{c3}-d) \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$[{}^3H_{\phi\phi}^c]_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

와 같이 나타내어진다. 중력 하중은 다음과 같이 표현된다.

$$F_g^i = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_i g \\ 0 \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, 3 \quad (32)$$

여기서, M_i 는 i 번째 링크의 질량을 의미한다. 위에서 구하여진 관계식들에 근거하여, 힘벡터들과 H 행렬들 간의 일반화된 수량 곱(generalized scalar product)을 수행하면, 식(7)의 마지막 두 항에 해당하는 강성행렬이 다음과 같이 얻어진다.

$$[K_{\phi\phi}] = \begin{bmatrix} p & s & t \\ s & s & t \\ t & t & t \end{bmatrix} \quad (33)$$

여기서,

$$p = F_x x_h + F_y y_y - M_1 g y_{c1} - M_2 g y_{c2} - M_3 g y_{c3} \quad (34)$$

$$s = F_x (x_h - a) + F_y (y_y - b) - M_2 g (y_{c2} - b) - M_3 g (y_{c3} - b) \quad (35)$$

$$t = F_x (x_h - c) + F_y (y_h - d) - M_3 g (y_{c3} - d) \quad (36)$$

위에서 얻어진 관계식들을 살펴보면, 로봇트에 작

용한 모멘트 성분은 강성의 생성에 도움이 되지 않음을 알 수 있다. 이것은 식(9)에서 보인 바와 같이 선형의 성격을 지니는 구속방정식 때문이다.

식(7)의 두번째 그리고 세번째 항에 해당되는 강성 행렬 $[K_{\phi\phi}]$ 이 양의 정부호이기 위한 필요 충분 조건은 다음과 같이 구해진다. (부록 3 참조)

$$p > s > t > 0 \quad (37)$$

식(37)은 세 개의 조건으로 나타내어질 수 있다.

$$(i) \quad t > 0 : F_y - \frac{M_3}{2} g > -\frac{x_h - c}{y_h - d} F_x = F_x \tan(\phi_3) \quad (38)$$

$$(ii) \quad s > t : F_y - \left(\frac{M_3}{2} + M_2\right) g > -\frac{c-a}{d-b} F_x = F_x \tan(\phi_2) \quad (39)$$

$$(iii) \quad p > s : F_y - \left(\frac{M_1}{2} + M_2 + M_3\right) g > -\frac{a}{b} F_x = F_x \tan(\phi_1) \quad (40)$$

여기에서,

$$\phi_i = \sum_{j=1}^i \phi_j + 90^\circ, \quad i=1, 2, 3 \quad (41)$$

식(38)~(40)에서 분모가 음일 경우에는 부등호의 방향이 바뀐다. 그리고 분모가 0일 경우에는 식(34)~(36)으로 분석을 수행한다.

4.1 무중력 또는 평면에서의 경우

첫번째로, 무중력 또는 평면의 경우를 고려해 본다. 이 경우는 식(38)~(40)에서 중력에 관련된 항을 고려하지 않는다. 식(38)~(40)은 각 축에 대한 안정지역을 의미하는데, 각 링크의 끝점에 수직인 직선을 그어 그 바깥지역이 안정지역을 나타낸다. Fig. 7은 식(38)~(40)의 세 식에 대한 안정지역을

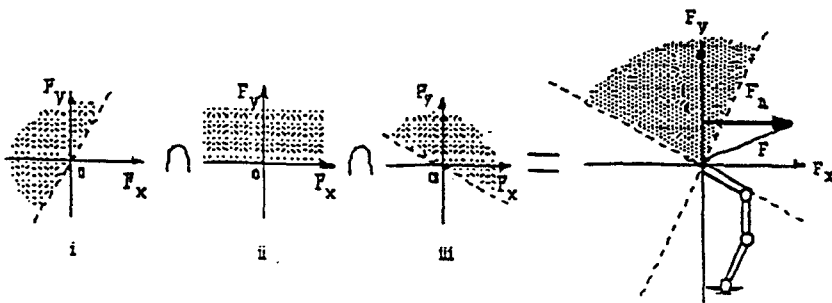


Fig. 7 Stable region under-zero gravity (case I)

직접적으로 합하여 나타낸 것이다. 로봇트에 작용하는 힘 F 가 빗금이 쳐진 지역 안에 있으면 이 시스템은 안정함을 의미한다. 그러나, 이러한 안정지역의 경계선(dashed line)들은 안정지역에 속하지 않는다. Fig. 8은 다른 매니플레이터 형체에서의 안정지역을 나타내는데 Fig. 7의 경우보다 더 넓은 안정지역을 가지고 있다. 일반적으로, 로봇트가 바깥방향으로 뻗힌 형체를 가지면 가질수록 안정지역은 더욱 더 넓어짐을 알 수 있다. 다시 말해서, ϕ_2 그리고 ϕ_3 가 0이 될수록 안정지역은 넓어진다.

이제는 매니플레이터와 작업대간의 상대적 위치 안정성이 안정지역에 미치는 영향에 대하여 살펴보고자 한다. Fig. 7과 Fig. 8에 있어서, X 축이 작업대 표면이라고 한다면(Fig. 9(a)), 로봇트에 작용된 합력벡터는 항상 3과 4분면의 불안정지역을 향하고 있기 때문에 이 시스템은 항상 불안정하다. 그러나, Y 축을 작업대 표면이라고 하면, Fig. 7의 1사분면에는 안정지역이 존재한다.(Fig. 9(b)) (Fig. 8의 경우는 2사분면에 해당된다.) Fig. 9(b)의 경우는 매니플레이터가 y 축의 음의 방향으로 움직일 때 발생하며 Fig. 1의 경우에 해당된다. 반면에 반대 방향으로 움직일 때는 합력이 4사분면으로 향하

기 때문에 이 시스템은 불안정성을 띄며 Fig. 2의 경우에 해당된다. 또한 Fig. 9(b)를 통하여 보면 큰 수직력(normal force, F_n^2)을 지닌 작업은 불안정함을 알 수 있다. 반면에 작은 수직력(F_n^1)을 가지고 있는 작업은 비교적 안정한 동작을 하는데 Fig. 1에서의 손가락실험을 통하여 역시 관찰할 수 있다. 여기서, 큰 안정성을 지니는 큰 수직력을 안정지역 안에서 작용할 수 있는 능력으로 정의하고자 한다. 따라서 Fig. 9(c)의 경우는 큰 수직력을 안정지역 안에 작용할 수 있기 때문에 이 매니플레이터 형체에 있어서 가장 큰 안정성을 가지고 있다고 말할 수 있다.

그리하여, 지금까지 많은 연구자들에 의해 관찰되어 온 채터링현상의 원인 중의 하나는 다음과 같이 설명되어질 수 있다. 로봇트에 작용된 합력이 불안정지역으로 향하여져 있을 때 불규칙한 작업면이나 또는 외부로부터의 동요로 인하여 시스템에 변화가 일어나면, 이 시스템은 불안정하여져서 로봇트가 접촉해 있는 작업 면을 이탈할 수 있다 이때, 시스템의 피드백에 의해 원래의 위치로 되돌아오며 요구되는 힘을 유지하려 할 것이다. 그러나, 피드백의 속도에 관계없이 항상 시간의 지연은 존

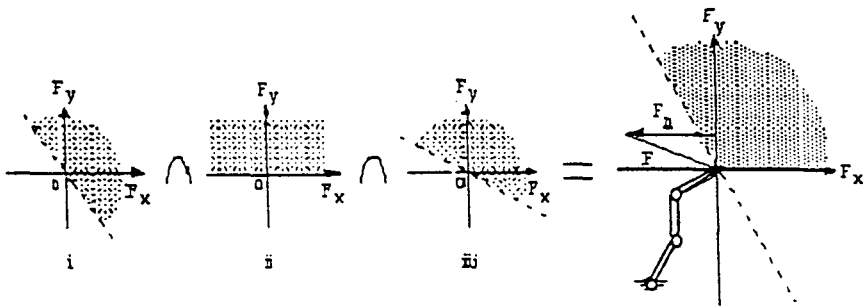


Fig. 8 Stable region under-zero gravity (case II)

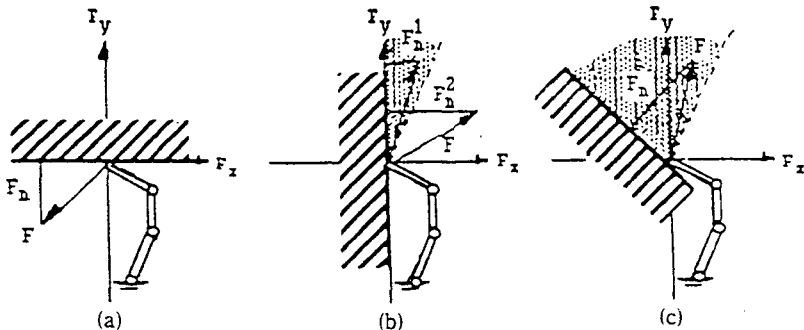


Fig. 9 Work station and stable region

재할 것이다. 또한, 심지어 빠른 속도로 처리되는 피드백일지라도, 작업환경과 매니플레이터 간의 연속적인 충돌과 같은 성격의 상호작용은 어떠한 피드백 하에서도 어려움이 따를 것이다. 이것은 피드백에 의한 복원작용이 작업환경과 충돌하는 상황이 또 시 시스템을 동요시키기 때문에 이와 같은 연속적인 동작은 Fig. 2의 경우에서 경험한 바와 같은 일종의 채터링현상을 발생시킨다고 해석할 수 있다. 반면에 합력의 방향이 안정지역으로 향하여져 있는 경우에는 외부로부터 시스템에 변화가 주어질 경우 피드백의 도움이 없이 원래의 위치로 복원하려는 현상을 갖게 된다. 이는 시스템에 작용하는 힘들의 상반작용으로 인하여 시스템에 생성된 고유한 상반강성이 복원력을 개회로(open-loop) 형태로 제공하기 때문이다. 따라서, 식(7)의 상반강성 항들이 양의 정부호임은 시스템의 개회로 안정성을 나타내는 일차적인 중요한 요건임을 알 수 있다.

4.2 중력장에서의 경우

중력장 하에서 세 개의 조건들(식(38)~(40))은 Figs. 10, 11과 같이 결합될 수 있다. 여기서, Y축이 역시 마찬가지로 작업 표면으로 간주된다. Figs. 10, 11을 살펴보면, 중력의 효과로 인하여 안정지역이 위로 올라갔음을 알 수 있다. 이동된 원점은 아래와 같이 나타내어진다.

$$P = (F_x, F_y) \tag{42}$$

여기서,

$$F_x = \frac{b(y_n - d) \left(\frac{M_1}{2} + M_2 + \frac{M_3}{2} \right) g}{a(y_n - d) - b(x_n - c)} \tag{43}$$

$$F_y = \frac{M_3}{2} g - \frac{b(x_n - c) \left(\frac{M_1}{2} + M_2 + \frac{M_3}{2} \right) g}{a(y_n - d) - b(x_n - c)} \tag{44}$$

위에서 살펴보면, 점선방향의 접촉력 F_y 가 y축의 양의 방향으로 이동된 만큼보다 작으면 이 시스

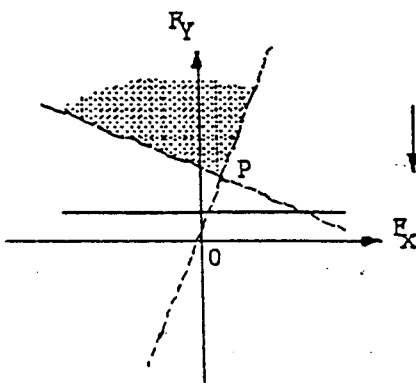


Fig. 10 Case I under gravity

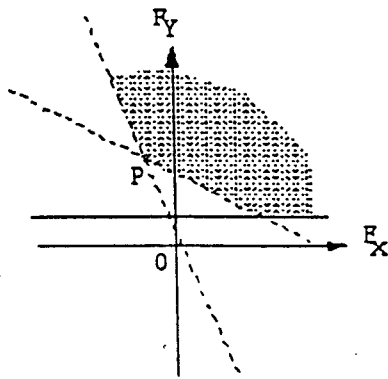


Fig. 11 Case II under gravity

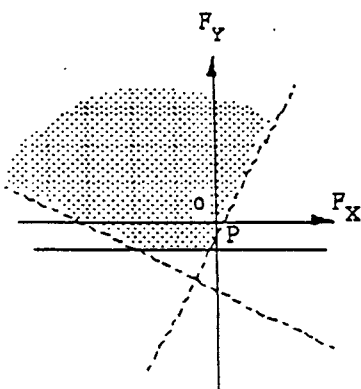


Fig. 12 Case I under reversed gravity field

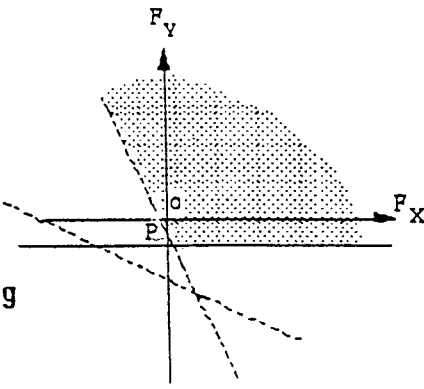


Fig. 13 Case II under reversed gravity field

템은 안정성을 지닐 수 없다. 일반적인 힘제어 응용에서는 접선방향의 힘 F_y 가 로봇트 끝점에서의 느껴지는 효과적인 중력보다 작기 때문에 Figs. 10, 11에서와 같은 양의 위치에너지(positive potential energy)를 가지는 로봇트 형체는 바람직하지 않다. 그러나, 반대방향의 중력장에서는 식 (38)~(40)에서 중력에 관련된 항들의 부호가 양이 되며, 이에 따라 Figs. 12, 13에서 보면 안정지역이 y 축의 음의 방향으로 이동한다.

$$P = \left(0, \frac{-M_3 g}{2} \right) \quad (45)$$

이 경우에는, 중력에 의한 힘이 도움이 된다. 이것은 무중력 하에서 불안정한 현상을 보여주었던 Fig. 2의 경우도 이동된 범위 안에서는 $(-\frac{M_3}{2}g < F_y < 0)$ 안정하게 되며, Fig. 1의 경우에 있어서도 전체 접선방향의 힘 $(F_y + \frac{M_3}{2}g)$ 이 무중력 하에서의 접선력 보다도 크기 때문에 상대적으로 큰 수직력이 작용한다 할지라도, 무중력 상태의 경우보다도 좀 더 안정된 작업을 할 수 있기 때문이다. 또한 살펴볼 수 있는 것은, 마지막 링크의 질량 (M_3) 이 크면 클수록, 더 큰 수직력 작용 하에 안정된 힘 제어 작업을 할 수 있음을 알 수 있다.

이상에서 소개된 기하학적 안정성의 개념은 다른 기존의 접할 수 있는 힘제어 이론들보다도 기초적인 것으로 생각되지만, 힘제어 응용에 있어서 하나의 근본적인 문제로 제시되었으며, 실제의 힘제어 작업에 있어서 기존의 정립된 이론들과 함께 신중히 고려되어야 하리라고 판단된다.

5. 여유자유도 매니플레이터의 여유 자유도를 이용한 힘제어의 안정성 향상

이 절에서는 힘제어에서의 안정성을 향상시키기 위하여 여유자유도 매니플레이터의 여유자유도를 활용한 강성제어 알고리즘을 제안하고자 한다. 기

하학적 안정성을 나타내어 주는 식 (7)의 두번째 그리고 세번째 강성항들은 시스템 관절 파라미터들의 함수이므로, 여유자유도 매니플레이터의 관절 공간의 자가운동(self-motion)에 의하여 그 값이 변위된다. 따라서, 여유자유도는 이 시스템이 힘제어에 있어서 보다 나은 안정성을 지니도록 매니플레이터의 형체를 조정하는데 사용된다.

먼저, 매니플레이터가 힘제어를 하기 위해 처음으로 작업 면에 접촉하는 상황을 살펴보고자 한다. Fig. 14의 로봇트 형체들은 안쪽으로 접혀져 있다. 그러나, 이 경우들은 안정지역들이 작업대 밑으로 향하고 있어서(Fig. 14의 (b), (c)) 시스템이 항상 불안정하거나 아주 작은 안정지역을 지니고 있다. (Fig. 14(a)) 따라서, 바람직하지 않은 형체라고 말할 수 있다. 반면에, Fig. 15와 같이 로봇트가 어느 정도 바깥쪽으로 뻗혀 있는 경우에는 수반되는 힘제어가 안정하게 될 수 있도록 안정지역이 형성되어 있다.

다음으로 고려되는 사항으로는 Fig. 15에서 세 개의 다른 매니플레이터 형체들에 대한 해석이다. 로봇트가 작업대에 접촉하는 순간에는 항상 충돌(impact)이 뒤따른다. 이러한 현상은 시스템 제어에 있어서 저해되는 요소이므로 이로 인한 영향을 최소화시키는 것이 바람직하다. Fig. 16의 경우(Fig. 15A)가 세 가지 형체 중 접촉시 가장 충격이 작은 것으로 판단된다. 반면에 Fig. 17의 경우는 작업면 위에서 가장 넓은 안정지역을 지니고 있으며(이 경우는 매니플레이터가 x 축의 음의 방향으로 움직이는 경우 로봇트 끝에 작용된 합력벡터가 이 안정지역 안에 위치하는 것을 의미한다.) 따라서 다른 두 경우보다도 큰 수직력을 안정하게 작용할 수 있다. 중력장 하에서의 바람직한 매니플레이터의 형체는 중력장이 양의 Y 또는 X 방향으로 향하고 있을 때이다. Fig. 17의 형체는 양의 Y 또는 X 방향의 중력장 하에서는 역시 가장 큰 안정성을 지니고 있음을 알 수 있다.

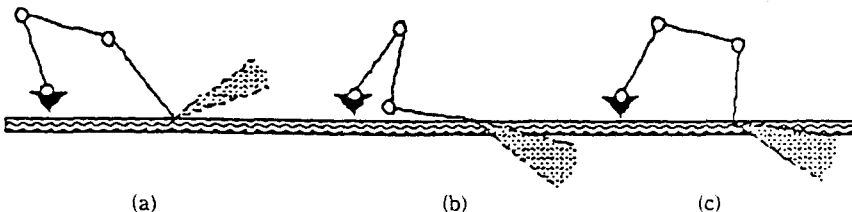


Fig. 14 Initial contact configurations

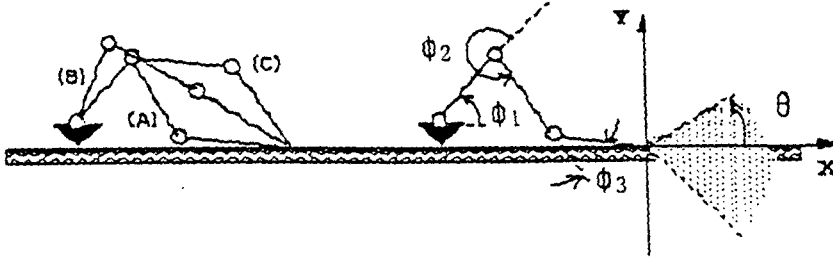


Fig. 15 Self-motion

Fig. 16 Configuration (A)

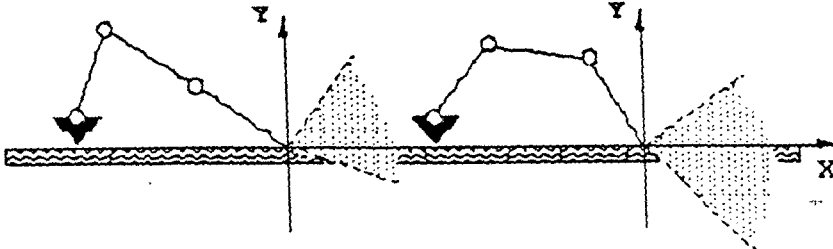


Fig. 17 Configuration (B)

Fig. 18 Configuration (C)

위에서 분석된 내용들에 근거하여 힘 제어 공정에 있어서 큰 안정성을 보장하기 위하여 다음과 같이 속도차원에서 알고리즘을 소개 한다.

$$\dot{\phi} = [G_0]^+ \dot{u} + ([I] - [G_0]^+ [G_0]) \varepsilon \quad (46)$$

여기서, $[G_0]^+$ 는

$$[G_0]^+ = [W]^{-1} [G_0]^T ([G_0] [W]^{-1} [G_0])^{-1} \quad (47)$$

과 같이 주어지고, $[W]$ 는 가중치행렬(weighting matrix)이다. 벡터 ε (null vector)는 두 단계에 있어서 선택되는데 첫번째로는 로봇트가 처음 머물러 있던 지점부터 작업대에 접근하여 접촉하는 순간에 충격을 최소화할 수 있도록 ε 이 선택된다. 이 선택은 ε 은 접촉시 $T (=1/\bar{F})$; \bar{F} 는 충격량을 의미 함)가 최대화되도록 자가운동을 제어해 주며 다음과 같이 선택되어진다.

$$\varepsilon_1 = (\nabla T) \quad (48)$$

여기서, 소개된 ε_1 은 Walker⁽¹⁷⁾에 의하여 제시되었으나, Fig. 15와 Fig. 16에서와 같이 뒤따르는 힘 제어에서의 안정성이 고려되지는 않았다. 두번째로, 작업대에서의 힘제어 작업에 있어서 보다 큰 안정성을 보장하기 위한 알고리즘이 다음과 같이 소개된다. 앞에서 큰 안정성을 가진다는 것은 큰 수직력을 안정하게 가할 수 있는 능력으로 정의하였다. 이것은 Fig. 16의 경우에 θ 각을 최대화시키

는 것을 의미하는데 ε 을 다음과 같이 ε_2 으로 선택 함으로서 성립된다.

$$\varepsilon_2 = (\nabla \theta) \quad (49)$$

θ 는 다음에서와 같이 세 개의 관절의 절대각 중 가장 최소값으로 선정된다.

$$\theta = \min(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \quad (50)$$

여기서, ϕ_i ($i=1, 2, 3$)는 식(41)에 정의되어 있고, 만일 ϕ_i 가 360° 이상이면 식(37)은 다음과 같이 반복적인 방식으로 수정되는데,

$$\phi_i = \phi_i - 360^\circ, \quad i=1, 2, 3 \quad (51)$$

이것은 90° 이동된 관절의 절대각 중의 최소값인 안정지역의 각(θ)을 결정하기 때문이다.

이렇게 두번째 관절 공간에서의 자가운동을 수행 함으로서 매니플레이터의 형태는 Fig. 16의 경우에서 Fig. 17과 같이 펼쳐진 경우로 변천할 것이다. 즉, 다시 말해서 ϕ_3 는 0이 될 것이고, 따라서 주어진 작업대 상의 로봇점착 위치에 대하여

$$x_2 = L_1 C_1 + L C_{1+2} \quad (52)$$

$$y_2 = 0 = L_1 S_1 + L S_{1+2} \quad (53)$$

다음과 같이 ϕ_1 과 ϕ_2 이 구하여질 수 있다.

$$\phi_2 = \cos^{-1} \left[\frac{x_2^2 - (L_1^2 + L^2)}{2L_1L} \right] \quad (54)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left[\frac{S_2}{C_2 + (L_1/L)} \right] \quad (55)$$

여기서, L 은 $(L_2 + L_3)$ 이다. 매니플레이터가 힘제어를 하면서 주어진 경로를 따라 연속적으로 움직임에 따라, ϕ_1 와 ϕ_2 는 계속적으로 계산되어질 것이다. 가장 큰 안정성을 보장하기 위해서 ϕ_3 는 계속적으로 0으로 유지되어야 한다.

이상의 사항들을 정리해보면, 주어진 로봇트가 작업대를 접근할 때 먼저 접하지 않은 형체를 가지며 작업대와 충돌시 충격을 적게 받도록 자가운동을 행한다. 그 이후, 힘제어가 어느 특정한 경로를 따라 시작되기 전에 가장 큰 안정성을 지닐 수 있도록 접촉된 위치에서 두번째 자가운동을 통하여 새로운 형체를 유지하면서 힘제어가 행하여진다. 이상에서 소개된 연속된 성능기준(sequential performance indices)들을 이용한 자가운동 전략은 전반적인 힘제어 작업에서의 안정성을 향상시키는 중요한 역할을 하리라 기대한다.

5. 결 론

로봇트를 이용한 힘제어는 최근에 대두되어 오던 과제이며, 이에 관련된 불안정성에 대한 연구가 활발하게 진행되어져 왔다. 본 논문에서는 기하학적 안정성이란 개념이 힘제어를 안정하게 수행하는데 있어서 다른 하나의 중요한 요소임을 보였다. (상반되는 힘의 평형상태에서 발생하는 상반강성의 특성이 기하학적 안정성을 나타내어 주는 기준임이 밝혔다. 결론적으로, 힘이 제어되는 방향과 매니플레이터의 형체는, 무중력 그리고 중력을 고려한 경우를 막론하고, 안정된 힘제어 작업을 하기 위하여 신중히 고려, 선택되어야 한다는 것을 알 수 있었다. 또한 여유자유도 매니플레이터의 여유자유도는 힘제어에 있어서의 전반적인 안정성을 향상시키기 위하여 유용하게 쓰일 수 있었는데 접촉시 충격을 줄이고 이어지는 힘제어 작업에서 가장 큰 안정성을 보장할 수 있도록 연속적인 성능 기준들을 도입하였다.

본 논문에서 소개된 기하학적 안정성의 개념은 다른 기준의 접할 수 있는 힘제어 이론들보다도 기초적인 것으로 생각되지만, 힘제어 응용에 있어서 하나의 근본적인 문제로 제시되었으며, 실제로 힘제어 작업에 있어서 기존의 정립된 이론들과 함께 신중히 고려되어야 하리라고 판단된다. 그러나, 안

정된 힘제어 작업을 위해서는 이 밖에 고려되어야 할 점들이 무수히 많으리라고 간주되며 이론과 실제에 있어서 많은 연구가 지속되어야 하겠다. 또한, 기하학적 안정성을 대변해 주는 상반강성(antagonistic atiffness)항은 그동안 일반적인 직렬형 매니플레이터의 강성모델들에서 뿐만 아니라, 다관절손(multi-fingered hands), Walking machine 등에서의 강성모델들에서도 고려되지 않았다. 따라서, 이 논문에서 보여진 상반 강성의 역할은 이러한 시스템들에서도 충분히 검토, 분석되어야 할 것이다.

부 록 1

시스템에 미소의 변위가 주어지면 식 (5)는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} & \left([I_{**}^*] + \frac{\partial [I_{**}^*]}{\partial \phi} \delta \phi \right) (\ddot{\phi} + \delta \ddot{\phi}) + (\dot{\phi}^T + \delta \dot{\phi}^T) \\ & \left([P_{***}^*] + \frac{\partial [P_{***}^*]}{\partial \phi} \delta \phi \right) (\dot{\phi} + \delta \dot{\phi}) \\ & = \left(T_* + \frac{\partial T_*}{\partial \phi} \delta \phi + \frac{\partial T_*}{\partial \phi} \delta \phi \right) \\ & \quad + ([G_*^*]^T + [H_{**}^*]^T \delta \phi) T_u \\ & \quad + \sum_{i=1}^M ([G_i^*]^T + [H_{**}^*]^T \delta \phi) (F_i^*) \end{aligned} \quad (A1)$$

여기서, $\frac{\partial T_*}{\partial \phi}$ 와 $\frac{\partial T_u}{\partial \phi}$ 는 각각 다음과 같이 피드백 행렬을 나타낸다.

$$\frac{\partial T_*}{\partial \phi} = -[K_{**}^*] \quad (A2)$$

$$\frac{\partial T_u}{\partial \phi} = -[B_{**}^*] \quad (A3)$$

정적 평형상태 하에서는 $\ddot{\phi}$ 와 $\dot{\phi}$ 는 0이고 미소변위의 곱셈 항들($\delta \phi \delta \phi^2$, $\delta \phi \delta \dot{\phi}$, $\delta \phi^2$)은 무시할 수 있으므로 식(A1)는 식(6)과 같이 구해진다.

부 록 2

Generalized Scalar Dot Product(o)

$$[A]o[B] = [C] \quad A4$$

여기서, $[A]$, $[B]$, $[C]$ 는 각각 $P \times Q$, $Q \times M \times N$, $P \times M \times N$ 의 차원을 갖는다. 텐서의 형태로는

$$c_{ijk} = \sum_{l=1}^Q a_{il} b_{ljk} \quad A5$$

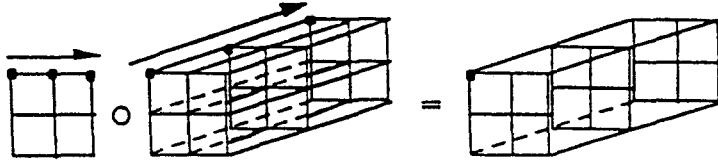


Fig. A C111

여기서 i 는 $[C]$ 의 평면 그리고 $[A]$ 의 행을 나타내
고, k 와 l 은 $[C]$ 와 $[B]$ 의 행과 열을 각각 나타내
며, j 는 $[A]$ 의 열 그리고 $[B]$ 의 평면을 나타낸다.
이 작업은 Freeman과 Tesar⁽⁸⁾에 의해 처음으로
정의되었다. 이것은 동일한 형태를 지닌 변환기술
의 체계적인 개발에 있어서 중요한 역할을 한다.
이 작업의 용도는 3차원 $[B]$ 행렬의 각 평면행렬을
하나의 값(a_{ij} , $j=1, 2, \dots, N$)으로 곱하여 모두 더
해 주는 기능을 하는데 다음과 같이 도식적으로 나
타낼 수 있다.

부 록 3

하나의 행렬이 양의 정부호이기 위해서는 모든
principle minor가 양이어야 한다. 다음과 같은 3
 \times 3 행렬에서는

$$[K_{\theta\theta}] = \begin{bmatrix} p & s & t \\ s & s & t \\ t & t & t \end{bmatrix} \quad (A6)$$

디터미넌트(determinant)에 대한 다음의 세 가지
조건들이 만족되어야 한다. 첫번째 minor에 대하
여는,

$$\det(p) = p > 0 \quad (A7)$$

두번째 minor에 대하여는

$$\det \begin{bmatrix} p & s \\ s & s \end{bmatrix} = (p-s)s > 0 \quad (A8)$$

여기서, $(p-s)s$ 는 항상 음이어야 하기 때문에 s
는 음이 될 수가 없다. 그리하여, s 는 양이어야 하
며, 또한 p 보다 작다. 세번째 minor에 대하여는,

$$\det \begin{bmatrix} p & s & t \\ s & s & t \\ t & t & t \end{bmatrix} = (p-s)(s-t) > 0 \quad (A9)$$

여기서, $(s-t)s$ 는 항상 음이기 때문에 t 는 음이
될 수 없다. 위의 결과들을 결합하면, 3 \times 3 강성

행렬이 양의 정부호이기 위한 필요충분 조건은 다
음과 같이 구해진다.

$$p > s > t > 0 \quad (A10)$$

참고문헌

- (1) Anderson, R. and Spong, M., 1987, "Hybrid Impedance Control of Robot Manipulators," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, NC, pp. 1073-1079.
- (2) An, C. H., 1988, "Model-Based Control of Robot Manipulator," MIT Press.
- (3) An, C. H. and Hollerbach, J. M., 1987a, "Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, NC, pp. 890-896.
- (4) An, C. H. and Hollerbach, J. M., 1987b, "Kinematic Stability Issues in Force-Control of Manipulators," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, NC, pp. 897-903.
- (5) Burdick, J. W., 1988, "Kinematic Analysis and Design of Redundant Robot Manipulators," Ph. D. Dissertatio, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.
- (6) Eppinger, S. D. and Seering, W. P., 1986, "On Dynamic Models of Robot Force Control," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, CA, pp. 29-34.
- (7) Eppinger, S. D. and Seering, W. P., 1987, "Understanding Bandwidth Limitations in Robot Force Control," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, NC, pp. 904-909.
- (8) Freeman, R. A. and Tesar, D., 1988, "Dynamic

- Modeling of Serial and Parallel Mechanisms/Robotic Systems, Part I-Methodology, Part II-Applications," *The 1988 ASME Design Technical Conf. 20th Biennial Mechanisms Conf. Kissimmee, FL*, pp. 7~21.
- (9) Griffis, M. W., 1991, "Kinesthetic Control: A Novel Theory for Simultaneously Regulating Force and Displacement," Ph. D Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of Florida, Gainesville.
- (10) Hogan, N., 1985, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part II-Implementation," *ASME J. of Dyn. Sys., Meas. and Control*, Vol. 107, pp. 8~16.
- (11) Kawamura, S., Miyazaki, F., and Arimoto, S., 1988, "Is a Local Linear PD Feedback Law Effective for Trajectory Tracking of Robot Motion," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, pp. 1335~1340
- (12) Kazerooni, H., Sheridan, T. B., and Houpt, P. K., 1986b, "Robust Compliant Motion for Manipulators, Part I-The fundamental Concepts of Compliant Motion," *IEEE Int. J. of Robotics and Automation, RA-2*, pp. 83~92
- (13) Kazerooni, H., Houpt, P. K., and Sheridan, T. B., 1986b, "Robust Compliant Motion for Manipulators, Part II-Design Method," *IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-2*, pp. 93~105
- (14) Khatib, O., 1987, "A Unified Approach for Motion and Force Control for Robot Manipulators: The Operational Space Formulation," *IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 1*, pp. 43~53.
- (15) Ligeois, A., 1977, "Automation Supervisory Control of the Configuration and Behaviour of Multibody Mechanisms," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.*, Vol. SMC-7, No. 12, pp. 868~871.
- (16) Lipkin, H. and Duffy, J., 1988, "Hybrid Twist and Wrench Control of a Robotic Manipulator," *Trans. ASME J. of Mechanisms, Trans., and Automation in Design*, 110, pp. 138~144.
- (17) Walker, I. D. 1990, "The Use of kinematic Redundancy in Reducing Impact and Contact Effects in Manipulation," *Proc. IEEE Int. conf. on Robotics and Automation, Cincinnati, OH*, pp. 434~439.
- (18) Whitney, D. E., 1987, "Historical Perspective on the State of the Art in Robot Force Control." *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 6, No. 1, pp. 3~14.
- (19) Yi, B. J. and Freeman, R. A., 1990, "Antagonistic Stiffness Characteristics Inherent in the Coordination of General Robotic Linkage Systems," *Proc. ASME 21st Biennial Mechanism Conf. Chicago, IL, DE-Vol. 24*, pp. 133~141.
- (20) Yoshikawa, T., 1985, "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy," *Robotics Research-The First Int. Symposium*, ed. Bray and Paul, MIT Press, pp. 735~747.