

여러 개의 수동 관절을 갖는 협조 로봇을 위한
단일 폐쇄 자코비안 제어방법의 설계 및 해석

Design and Analysis of a Single Closed-Jacobian-Based
Control Method for Two Cooperating Robots with
Multiple Passive Joints

류 창 훈, 엄 광 식*, 서 일 홍*, 이 병 주**

*한양대학교 전자공학과 (Tel : +82-345-408-5802; Fax : +82-345-408-5803; E-mail : chryu@scorpio.hanyang.ac.kr)

**한양대학교 제어계측공학과 (Tel : +82-345-400-4081; Fax : +82-345-408-5803; E-mail : bj@hyunp1.hanyang.ac.kr)

Abstract : In this paper, a design and analysis of a single closed-Jacobian-based control method is proposed for two cooperating robots which consist of two kinematically-nonidentical arms with multiple passive joints. Specifically, an algorithm is suggested to increase the mobility of kinematically constrained two arms up to the required degree of freedom for performing a task using passive joints. And a method is described for effective use of redundant actuation. To verify the effectiveness of the proposed control scheme, several numerical examples are illustrated for the sawing task employing 4 DOF SCARA and 5 DOF articulated manipulator.

Keywords : Cooperating Robots, Passive Joint, Jacobian Based Control, Sawing Task, Redundant Actuation

1. 서론

최근 들어 다중 로봇 시스템을 제어할 수 있는 제어기에 대한 필요성이 점차 증가하고 있다. 특히, 자동화 분야에서 복잡하고 정교한 작업을 수행하기 위해서는 다중 로봇과 외부 디바이스를 협조 제어할 수 있는 로봇 시스템이 필요하다. 또한, 여러 대의 로봇이 하나의 작업을 분담하여 수행하면 생산성을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 단일 로봇이 수행할 수 없는 복잡하고 어려운 작업도 수행 가능하다.

다중 로봇에 관련된 연구는 주로 기구학/동역학(Kinematic/Dynamic)모델링 및 해석분야, 제어분야, Decision Making-Criteria 분야 등이 있다[4,8,9,10]. 다중 로봇 시스템이 공통의 물체를 잡을 시에 동역학 모델은 개방(unconstrained)시스템에서 폐쇄(constrained)시스템으로 변화한다. 즉 기구학적인 폐쇄체인이 형성되어 전체 로봇 시스템의 기구학적 자유도(kinematic degree-of-freedom)보다 더 많은 수의 구동장치(actuator)를 가지기 때문에 여유구동 시스템(redundantly actuated system)이 된다. 그러나, 다중 로봇에 대한 선행 연구들은 몇 개의 동종(kinematically-identical) 로봇 매니플레이터로 구성된 병렬 매니플레이터(parallel manipulator)만 취급하였고 비 동종(kinematically-nonidentical) 매니플레이터간의 협조 제어는 고려되지 않았다. [10]에서는 두 대의 비 동종 로봇이 톱질 작업을 하는 하이브리드 제어 방법을 제안하였고, 수동 관절을 추가해서 톱질 작업에 불필요한 동작을 없앨 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 두 대의 로봇이 공통의 작업물을 잡는 형태(Configuration)와 로봇의 관절에 사용되는 수동 관절(Passive pin joint)에 따라 작업물 좌표계에서의 자유도가 결정됨을 보이고, 원하는 동작을 수행하도록 수동 관절을 삽입하는 방법과 각 액츄에이터에 가해지는 토크에 가중치(weight)를 부여해 전체 토크를 최소화하는 방법을 제시한다. 그리고, 독립적으로 제어 가능한 각각의 수동 관절을 포함한 자코비안 행렬로 구성된 하이브리드 제어 알고리즘(hybrid control algorithm)을 제안하고, 비 동종의 로봇인 SCARA 와 PT200V 가 톱을 잡고 협조 작업을 하는 모의 실험을 통해 결과의 유효성을 보인다.

2. 기구학 모델링

2.1 모빌리티(Mobility)

시스템의 운동 자유도는 모빌리티로 표현된다. R 개의 체인으로 형성된 매니플레이터를 고려하고, 시스템이 J 개의 관절과 L 개의 링크를 갖고 각 관절이 F_i 의 자유도를 갖는다고 가정하면 시스템의 모빌리티는

$$M = D(L-1) - \sum_{i=1}^J (D - F_i) \quad (1)$$

으로 정의된다[6]. 로봇 매니플레이터의 모빌리티는 모든 위치에서의 운동을 제어하는데 필요한 최소한의 독립변수의 수를 의미한다.

그림 1 은 본 논문에서 사용한 시스템의 구성을 나타낸다. PT200V 는 5 자유도를 가진 수직 다관절 로봇이며 SCARA 는 4 자유도를 가진 수평 다관절 로봇이다.

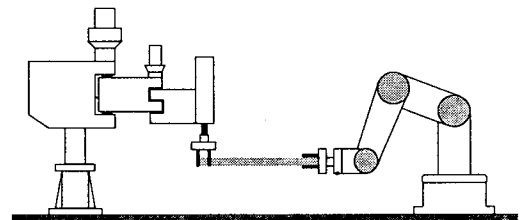


그림 1. 두 대의 로봇이 한 물체를 잡고 있는 환경

Fig. 1. Configuration of the two arm

두 로봇이 공통의 물체를 잡고 폐쇄 체인을 형성한다면 식(1)에 의해 이 시스템의 모빌리티는 3 이므로 세 방향을 독립적으로 제어하는 것이 가능하다. 그러나 세 방향의 위치변수와 한 방향의 힘 변수로는 원하는 작업을 행하기에는 부족하다. 그래서 두 로봇의 끝점에 수동관절을 하나씩 추가하여 전체 시스템의 운동 자유도를 5 로 증가 시켰다. 본 논문에서는 작업물 좌표계에서

원하는 자유도를 얻기 위해 [10]에서와는 다른 모양으로 PT200V가 톱을 잡는 형태(configuration)를 변형시켰다.

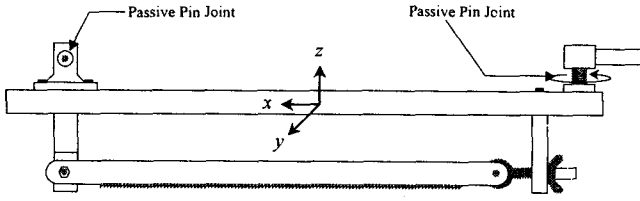


그림 2. 톱에 수동관절을 삽입한 그림
fig. 2. Inserted passive pin joints and the saw

수동 관절은 그림 2에서와 같이 좌측의 SCARA에는 물체 좌표계의 y 축 방향으로 추가되었고, 우측의 PT200V에는 z 축 방향으로 추가되었다. 일반적으로 두 로봇이 폐쇄 체인을 형성하고 있을 때 어느 한 로봇의 끝점에서 구현되지 않는 운동 방향은 전체의 폐쇄 체인 상에서의 두 로봇의 끝점에서도 구현되지 않는다. 즉 PT200V의 끝점은 x, y 축 방향의 회전 운동을 할 수 있지만 SCARA는 할 수 없으므로 폐쇄 체인의 물체 좌표계에서 그 방향의 운동은 구현될 수 없다. 마찬가지로 SCARA의 끝점은 z 축 방향으로의 회전 운동을 할 수 있지만 PT200V는 할 수 없으므로 폐쇄 체인의 물체 좌표계에서 그 방향의 운동은 구현될 수 없다. 그래서 본 논문에서는 운동 성분이 없는 로봇에 수동 관절(Passive pin joint)을 추가 시킴으로써 다른 로봇으로 하여금 그 방향의 운동 성분을 낼 수 있도록 하였다. 즉 y, z 축 방향의 회전 운동 성분을 제어할 수가 있게 되었다. 각 로봇이 가지는 운동 방향과 추가된 수동 관절의 방향과의 관계를 표 1에 나타내었다.

표 1. 각 로봇이 가지는 운동 방향과 추가된 수동 관절의 방향

Table 1. Motion direction of two arms and inserted passive pin joint

SCARA	운동 방향	PT200V
Possible motion	v_x	Possible motion
Possible motion	v_y	Possible motion
Possible motion	v_z	Possible motion
Impossible motion	ω_x	Possible motion
Impossible motion →수동 관절 추가	ω_y	Possible motion
Possible motion	ω_z	Impossible motion →수동 관절 추가

표 1에서 보면 한 로봇에서는 구현되지만 다른 로봇에서는 구현되지않는 운동이 세 방향이 있다. 이와 같이 한 로봇에 운동 성분이 없어 고정되어 있는 방향에 수동 관절을 추가해 주면 추가된 수동 관절 자체는 구동을 해줄 수는 없지만 고정되어 있던 운동 성분을 자유롭게 해주어 다른 구동관절로 하여금 그 방향의 운동을 가능하게 해준다. 또한 위와 같이 두 대의 로봇이 하나의 물체를 잡고 있는 경우는 각 로봇으로부터 물체까지 기구학적 구속관계(kinematic constraint)가 존재하므로 수동 관절의 변위는 정해될 수 있다. 위에서 ω_x 는 SCARA에 운동성분이 없으므로 제어 대상이 아니지만, 이 방향으로 수동 관절을 하나 더 추가하면 두 로봇이 잡고 있는 공통의 물체에서 6 자유도를 모두 제어할 수 있을 것이다.

2.2 폐쇄 체인의 내부 기구학 (Internal Kinematics)

폐쇄 체인의 내부 기구학은 두 개의 직렬 체인이 주어진 작업 공간에서 공통의 물체를 잡고 움직이는 것을 고려 대상으로 한다. 본 논문에서는 두 로봇이 톱을 잡고 협조작업을 행하기 때문에 각 로봇이 잡고 있는 톱을 고려해 주었다. 그리고 실제 톱과 절삭 대상과의 접촉점은 계속해서 변하므로 톱의 중간점을 각 로봇의 초기 위치에서의 끝점으로 설정해 주었다. 이 끝점은 로봇이 협조작업을 행하면서 계속해서 변하므로, 작업물 좌표계와 로봇 관절 좌표계 사이의 관계를 나타내는 자코비안 행렬의 파라미터는 변화하게 된다.

로봇 끝점의 속도 벡터(\dot{u})는 r 번째 개방 체인의 경우에 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{u} = [{}_r J] {}_r \dot{\phi} \quad (2)$$

여기서 $[{}_r J]$ 는 로봇 끝점 좌표계 벡터와 관절 좌표계 벡터의 관련을 나타내는 1차 기구학적 영향 계수 행렬을 나타내고, ${}_r \dot{\phi}$ 은 r 번째 개방 체인의 관절 속도 벡터를 나타낸다. 식(2)는 하나의 로봇의 관절 속도 집합을 다른 하나의 로봇의 관절 속도 집합과 연관짓는 식이며, 다음과 같이 표현된다.

$$[{}_1 J] {}_1 \dot{\phi} = [{}_2 J] {}_2 \dot{\phi} \quad (3)$$

식(3)의 양 변은 각 체인의 독립, 종속 관절 속도 집합에 따라 다음 식(4)와 같이 표현되고[3],

$$[{}_1 J_a] {}_1 \dot{\phi}_a + [{}_1 J_p] {}_1 \dot{\phi}_p = [{}_2 J_a] {}_2 \dot{\phi}_a + [{}_2 J_p] {}_2 \dot{\phi}_p \quad (4)$$

각 체인의 독립 관절 벡터($\dot{\phi}_a$)와 종속 관절 벡터($\dot{\phi}_p$)를 모아서 재배치하여 다음과 같은 단일한 행렬 방정식으로 표현한다.

$$\dot{\phi}_p = [G_a^p] \dot{\phi}_a \quad (5)$$

여기서 $[G_a^p]$ 는 두 대 로봇 시스템의 1차 내부 기구학적 영향계수(IKIC)행렬을 나타낸다. $\dot{\phi}$ 가 시스템의 전체 관절 속도 벡터를 나타낸다고 가정하면, 독립 관절 벡터와의 관계는 식(6)과 같이 표현된다.

$$\dot{\phi} = [G_a^{\phi}] \dot{\phi}_a \quad (6)$$

여기서 $[G_a^{\phi}]$ 는 독립 관절 벡터와 두 로봇의 모든 관절 벡터간의 관계를 나타내는 행렬이며 식(7)과 같이 표현된다.

$$[G_a^{\phi}] = \begin{bmatrix} [I] \\ [G_a^p] \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3 폐쇄 체인의 외부 기구학 (External Kinematics)

r 번째 체인의 관절 벡터(${}_r \dot{\phi}$)는 독립 관절과 종속 관절로 이루어져 있기 때문에, ${}_r \dot{\phi}$ 는 식(8)과 같이 시스템의 독립 관절 벡터에 관해 표현될 수가 있다.

$${}_r \dot{\phi} = \begin{bmatrix} {}_r \dot{\phi}_a \\ {}_r \dot{\phi}_p \end{bmatrix} = [{}_r G_a^{\phi}] \dot{\phi}_a \quad (8)$$

여기서 $[{}_r G_a^{\phi}]$ 는 식(5)에서 ${}_r \dot{\phi}_p$ 에 해당되는 열들을 추출함으로써 얻어진다. 따라서, 공통의 물체에 대한 순방향 기구학은 1차 IKIC를 하나의 개방 직렬 체인에 접속함으로써 최종적으로 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{u}=[{}_rJ]_r\dot{\phi}=[G_a^u]\dot{\phi}_a \quad (9)$$

여기서,

$$[G_a^u]=[{}_rJ][{}_rG_a^{\phi}] \quad (10)$$

3. 톱질 작업을 위한 힘 제어 알고리즘

톱질 작업에서는 대상 물체와 접촉을 잃지 않고 수직인 방향(즉, 음의 z 방향)으로 일정한 수준의 힘을 제어할 수 있어야 한다. 그림 3은 본 논문에서 제안하는 제어기의 블록도이다.

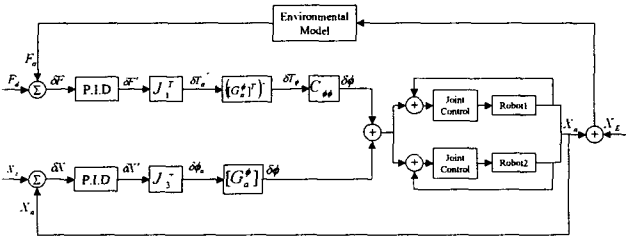


그림 3. 제안된 알고리즘에 대한 블록도

Fig. 3. Block diagram of the proposed hybrid control scheme

힘 에러를 보상하기 위해 PID 제어기[11]를 이용하였으며, 보상될 힘 에러 $\delta F'$ 에 대해, 최소 입력 위치에서의 부하 δT_a 는 식(11)에 의해 계산된다.

$$\delta T_a=[J_1]^{-T}\delta F' \quad (11)$$

여기서 제어되는 힘의 방향은 z 방향이므로 $[J_1]$ 는 $[G_a^u]$ 의 세 번째 행을 선택하여 구한 1×5 차원을 가진 행렬이다. 전체 관절을 구동하는 경우 독립 관절에서의 최소 구동 부하는 다음과 같이 표현되며,

$$T_a=[G_a^{\phi}]^{-T}T_{\phi} \quad (12)$$

이 식의 미분 관계식은 식(13)과 같으며 독립 관절과 수동 관절 사이의 톱질 관계를 나타낸다.

$$\delta T_a=[G_a^{\phi}]^{-T}\delta T_{\phi} \quad (13)$$

식(13)의 일반 해는 다음 식(14)와 같이 구해진다.

$$\delta T_{\phi}=\left([G_a^{\phi}]^{-T}\right)^{\dagger}\delta T_a+\left(\left[1\right]-\left([G_a^{\phi}]^{-T}\right)^{\dagger}\left([G_a^{\phi}]^{-T}\right)^T\right)\epsilon \quad (14)$$

여기서 $\left([G_a^{\phi}]^{-T}\right)^{\dagger}$ 는 $[G_a^{\phi}]^{-T}$ 의 유사 역행렬(pseudo-inverse)해이고, 첫째, 둘째 항은 각각 특수해(particular solution)와 제차해(homogeneous solution)를 나타낸다. 특수해는 정해진 동작을 행하는 최소놈 해(minimum norm solution)를 나타내는 반면, 제차해는 내력(internal load)를 나타낸다.

[10]에서는 내력을 이용해 y 축에 대한 회전운동 성분인 pitch motion을 없애주었으나 흔들림이 약간 남아있음을 알 수 있다. 식(15)는 식(14)의 우변의 둘째 항을 0으로 해준 것으로서 δT_{ϕ} 를 최소로 하는 해(minimum norm solution)를 구한다는 의미이다. 즉 각 축의 톱질의 평균값인 $\sqrt{T_{a1}^2+T_{a2}^2+\dots}$ 를 구하는 것과 같다.

$$\delta T_{\phi}=\left([G_a^{\phi}]^{-T}\right)^{\dagger}\delta T_a \quad (15)$$

이는 각 축의 정격 톱질(torque)양이 고려되지 않은 것이고, 빠른 톱질 작업이 수행되는 경우 saturation에 의해 좋지 못한 성능(performance)을 낼 수도 있다. 따라서 각 액츄에이터에 가중치(weight)를 부과할 수 있는 방법이 제안된다. 식(16)은 weighted norm을 최소화 할 수 있는 해이다.

$$\delta T_{\phi}=Q_0^{-1}\left(P_0[G_a^{\phi}]^{-T}Q_0^{-1}\right)^{\dagger}P_0\delta T_a \quad (16)$$

여기서 P_0 는 $m \times m$ 의 항등 행렬(identity matrix)이고 Q_0 는 각 축의 정격 톱질 값(limit value)의 inverse 값을 대각원소로 하는 행렬이다. 즉 식(17)과 같이 b 를 정의하면,

$$b=\left[\begin{array}{c} \delta T_{\phi 1} \\ \vdots \\ \delta T_{\phi n} \\ \tau_{limit 1} \\ \vdots \\ \tau_{limit n} \end{array}\right]^T \quad (17)$$

δT_{ϕ} 는 $\|b\|_2$ 를 최소로 하는 해이다.

힘 제어에서 중요한 요소의 하나는 주변 환경의 모델링이다. 본 논문에서는 [10]의 실험으로 측정된 환경의 강성(stiffness)값을 이용해 모의 실험을 행하였다. 이 값은 한 물체를 일정한 힘으로 눌렀을 때 힘 센서로부터 피드백(feedback)된 힘과 위치 변화량을 이용해 계산한 값으로서 약 22,000(N/m)이었다. 이 값의 역수인 C_E 를 이용해 각 관절의 강성값과 환경의 강성값과의 관계식인 식(18)을 얻을 수 있다. 이 식을 이용해 각 관절에 가해지는 톱질의 변화량을 관절각의 변위로 바꾸어 줄 수가 있다.

$$C_{\#}=[G_a^{\phi}][J_1]^{-1}[C_E][J_1]^{-T}[G_a^{\phi}]^T \quad (18)$$

일반적인 폐쇄 체인 시스템은 힘 여유 구동(force redundancy)을 가지게 된다. 본 논문에서는 폐쇄 체인 시스템의 전체 액츄에이터 11개 중 5개를 독립적으로 제어해 주고, 나머지 6개는 종속적으로 구동되는 여유 구동력을 가지게 된다. 즉 이 6개의 여유 액츄에이터를 이용해 톱질 작업에 불필요한 여러 동작을 제거하는 데 이용할 수가 있다.

4. 톱질 작업을 위한 속도 제어 알고리즘

일반적으로 톱질 작업에서의 경로는 평면에 대해 일직선을 따라 수행된다. [10]에서는 x 방향과 y 방향의 직선운동 성분과 z 방향의 회전 운동 성분을 속도 제어 루프에 포함시켜 제어해 주었고 y 방향의 회전 운동 성분을 내력 제어를 통해 제어해 주었다. 본 논문에서는 수동 관절을 하나 더 추가해 모빌리티를 증가시켜 x 축 방향과 z 축 방향의 직선운동 성분, 그리고 y 축과 z 축 방향의 회전운동 성분, 즉 네 가지의 운동 성분을 속도 제어 루프에서 제어해 주었다.

네 방향의 속도 성분 벡터와 최소 액츄에이터 사이의 관계를 나타내주는 자코비안식은 식(19)과 같다.

$$v=\left[\begin{array}{c} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \omega_y \\ \omega_z \end{array}\right]=[J_3]\dot{\phi}_a \quad (19)$$

여기서 $[J_3]$ 은 $[G_a^u]$ 의 첫째, 둘째, 다섯째, 여섯째 행을 선택하여 구한 행렬이다. 이는 모든 방향의 속도 성분 중에서 제어 방향을 선택해주는 역할을 한다.

톱질 작업 경로는 오프 라인으로 계획되고, 주어진 경로와 식(20)에 의해 최소 액츄에이터의 관절의 속도 성분이 결정된다.

$$\dot{\phi}_a=[J_3]^{-1}v \quad (20)$$

식(20)과 식(6)에 의해 모든 액츄에이터에서의 관절 속도 성분이 구해질 수 있다.

5. 모의 실험

본 모의 실험에서는 계획된 톱질 경로와 힘 응답을 보였고 외란으로 y 축으로의 회전 운동 성분인 Pitch motion 을 인가했을 때 경로에 미치는 영향을 보였다.

그림 4.는 x 축 방향으로 계획된 톱질의 경로를 나타낸 그림이고, 그림 5.는 힘 응답곡선으로서 처음에 계획했던 10N 을 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 그림 6.은 환경 모델을 통해서 피드백된 톱질의 경로 곡선으로서 그림 4.와 거의 같음을 알 수 있다. 그림 7.은 톱질 경로에 임의로 추가한 외란 곡선으로서 실제 톱질 시에 발생하는 외란과 유사하게 넣어주었다. 그림 8.과 그림 9.는 경로에 외란이 추가될 때 이를 제어하지 않았을 때와 제어해 두었을 때의 경로 곡선으로서, 그림 8.에서는 y 축으로의 회전운동 성분이 외란으로 인해 심하게 영향을 받지만 그림 9.에서 보면 외란의 영향이 상당히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이로써 수동 관절을 삽입함으로써 그 방향의 운동을 제어해 줄 수 있음을 알 수 있다.

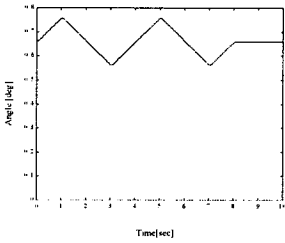


그림 4. X축 방향으로 계획된 톱질 경로
Fig. 4. Sawing Trajectory along the X-axis

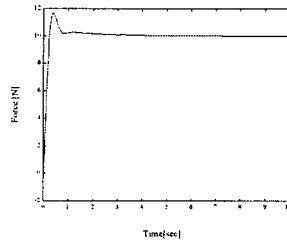


그림 5. 외란이 없을 때의 힘 응답
Fig. 5. Force Response without Disturbance

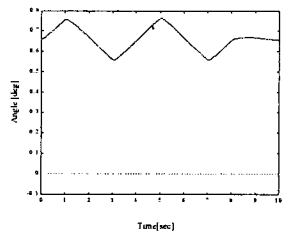


그림 6. 외란이 없을 때 피드백된 톱질 경로
Fig. 6. Feedback sawing trajectory without disturbance

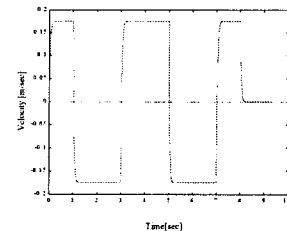


그림 7. 톱질 경로에 인가된 외란
Fig. 7. Disturbance Input applied to the Pitch motion

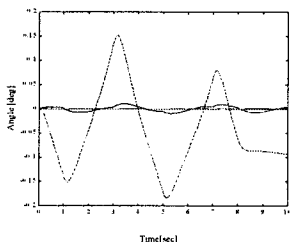


그림 8. 외란이 제거되지 않은 경로 에러
Fig. 8. Pitch motion error Response

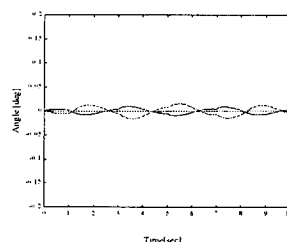


그림 9. 외란이 제거된 경로 에러
Fig. 9. Pitch motion error Response

6. 결론 및 추후과제

본 논문에서는 두 대의 로봇이 공통의 작업물을 잡고 폐쇄 체인을 형성하는 데 있어서 두 로봇이 이루는 형태(configuration)와 로봇의 관절에 사용되는 수동 관절(Passive pin joint)에 따라

작업물 좌표계에서의 자유도가 결정되는 것과 제어 가능한 동작이 결정되도록 수동 관절을 삽입하는 방법을 제시하였고, 전체 액츄에이터에 가해지는 토크를 최소화하기 위한 방법으로 각 토크에 가중치를 부여했는데 이는 고속으로 톱질을 할 때 각 액츄에이터의 saturation 을 방지할 수 있다.

모의 실험에서는 수동 관절이 삽입된 방향의 운동이 외란에 강인하게 제어될 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 수동 관절을 두 개 추가해 5 자유도를 구현하였으나 SCARA 에 하나의 수동 관절을 더 추가하면 작업물 좌표계에서 6 자유도를 모두 구현할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] B. J. Yi, R. A. Freeman, "Geometric Analysis of Antagonistic Stiffness in Redundantly Actuated Parallel Mechanism," *Int. J. Robotic Systems*, Vol.10, No.5, 1993, pp.581-603.
- [2] I. H. Suh, K. S. Eom, H. J. Yeo, and S.-R.Oh, "Fuzzy Adaptation Force Control of Industrial Robot Manipulators with Position Servos," *Int. J. of Mechatronics*, Vol.5, No.8, 1995, pp. 899-918.
- [3] J. M. Tao, J. Y. S. Luh, and Y. F. Zheng, "Compliant Coordination Control of Two Moving Industrial Robots," *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, Vol.6, No.3, 1990, pp. 322-330.
- [4] I. D. Walker, R. A. Freeman, and S. I. Marcus, "Analysis of Motion and Internal Loading of Objects Grasped by Multiple Cooperating Manipulators," *Int. J. Robotics Research*, Vol.10, No.4, 1991, pp.396-409.
- [5] T. Yoshikawa and X. Z. Zheng, "Coordinated Dynamic Hybrid Position/Force Control for Multiple Robot Manipulators Handling One Constrained Object," *Int. J. Robotics Research*, Vol.12, No.3, 1993, pp. 219-230.
- [6] K. H. Hunt, "Kinematic Geometry of Mechanisms," Clarendon Press, 1978
- [7] S. Fujii and S. Kurono, "Coordinated Computer Control of a Pair of Manipulators," *Proc. 4th IFTIMM World Congress*, 1975, pp. 411-417.
- [8] R.G.Bonitz and T.C.Hsia, "Internal Force-Based Impedance Control for Cooperating Manipulators," *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, Vol. 12, No.1, 1996, pp.78-89.
- [9] M. Uchiyama and P. Dauchez, "A Symmetric Hybrid Position/Force Control Scheme for the Coordination of Two Robots," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, Philadelphia, 1988, pp. 350-356.
- [10] H.J.Yeo, I.H.Suh, B.J.Yi, S.R.Oh, and B.H.Lee, "A Closed-Chain Jacobian-Based Hybrid Control for Two Cooperating Arms with a Passive Joint : An Application to Sawing Task," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, New Mexico, 1997, pp.1793-1800.
- [11] S. Tzafetas, "Incremental Fuzzy Expert PID Control," *Journal of IEEE Industrial Electronics*, Vol. 15, 1979, pp. 15-30.