

적응 순응성을 갖는 힘-가이드 제어 기법을 이용한 두 팔 로봇 협동 조립 작업

Two-Arm Cooperative Assembly Using Force-Guided Control with Adaptive Accommodation

최 종 도, 강 성 철, 김 문 상, 이 종 원, 송 제 복
(Jong-Dho Choi, Sungchul Kang, Munsang Kim, Chong-won Lee, and Jaebok Song)

Abstract : In this paper, a new two-arm cooperative assembly(or insertion) algorithm is proposed. As a force-guided control method for the cooperative assembly, the adaptive accommodation controller is adopted since it does not require any complicated contact state analysis nor depends on the geometrical complexity of the assembly parts. Also, the RMRC(resolved motion rate control) method using a relative jacobian is used to solve inverse kinematics for two manipulators. By using the relative jacobian, the two cooperative redundant manipulators can be formed as a new single redundant manipulator. Two arms can perform a variety of insertion tasks by using a relative motion between their end effectors. A force/torque sensing model, using an approximated penetration depth calculation algorithm, is developed and used to compute a contact force/torque in the graphic assembly simulation. By using the adaptive accommodation controller and the force/torque sensing model, both planar and a spatial cooperative assembly tasks have been successfully executed in the graphic simulation. Finally, through a cooperative assembly task experiment using a humanoid robot CENTAUR, which inserts a spatially bent pin into a hole, its feasibility and applicability of the proposed algorithm verified.

Keywords : robot assembly, two-arm coordination

1. 서론

두 팔 로봇 협동작업은 한 팔 로봇에 비하여 중하중(heavy load) 작업이 가능하며 에너지, 속도면에서 효율적인 많은 연구를 통해 입증되어왔다[1-3]. 또한 두 팔 작업은 인간이 흔히 무의식적으로 하는 행동의 상당부분을 차지하므로 인간형 로봇의 양팔 작업의 성능을 개선하기 위한 연구에도 그 가치가 있다. 이러한 두 팔 작업 계획 및 제어는 로봇 팔의 기구학적 제한 조건 극복, 충돌 방지 등의 위치제어 분야[1,2]와 여러 가지 다양한 힘의 제약을 받는 경우[3,4] 등으로 나뉘어 연구되어왔다. 특히, Duelen[5] 등은 힘의 제약을 받는 협동작업을 Fig. 1과 같이 세 가지로 분류하고 (a)와 (b)의 경우일 때의 기구학적, 동역학적 관제식을 유도하였으나, (c)의 경우와 같은 조립 작업에 대한 구체적인 방법을 제시하지는 못하였다. 이와 같이 두 팔 작업에 대한 연구들[1-4]이 주로 충돌 방지, 관절각 제한 조건 극복, 최적경로계획, 물체이동시 힘의 최적 분배 등을 논의하였으나 주위 환경과의 상호작용을 고려한 조립작업에 대한 연구는 상대적으로 부족하다고 할 수 있다[2,3]. 굳이 여러 대의 로봇이 협동 작업을 하는 경우가 아닌 경우라 할지라도 통계적으로 일반 기계, 전기제품의 생산 공정에서 조립공정이 차지하는 비율은 35% 정도가 된다[6]. 그만큼 조립공정은 제품의 생산 라인에서 큰 비중을 차지하며 산업용 로봇과 같은 자동화 기기를 이용한 조립공정의 자동화는 중요한 연구 분야로 간주되어 왔다. 그러

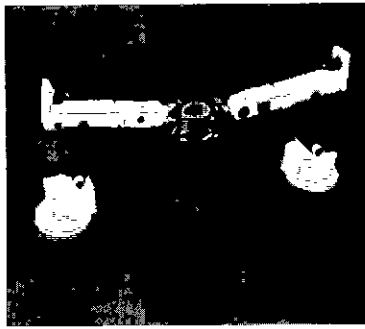
나 이러한 자동화의 중요성에도 불구하고, 현재 대부분의 공장의 조립공정은 전지부품과 같이 극히 단순한 삽입작업을 제외하고는 자동화되지 못하고 있는 실정이다. 그 이유는 조립 작업 시 로봇의 보정오차나 위치제어기의 서보 제어 오차 등으로 인하여 조립하고자 하는 부품과 환경 간에 접촉력이 발생하여 로봇 혹은 부품에 손상을 줄 수 있기 때문이다. 일반적으로 고강성의 위치제어기를 가진 로봇은 외부환경과 접촉시 큰 접촉력을 발생하게 되어 로봇의 위치오차가 삽입이유(insertion tolerance)보다 큰 경우 조립이 불가능하다. 이를 해결하기 위하여 로봇의 말단부(end-effector)에 컴플라이언스를 두어 조립시 발생하는 접촉력을 줄이고, 제밍(jamming) 현상을 방지함으로써 조립을 가능하게 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 로봇의 말단부에 컴플라이언스(compliance)를 두는 방법은 수동적 컴플라이언스(passive compliance)와 능동적 컴플라이언스(active compliance) 방법으로 분류된다. 먼저 수동적 컴플라이언스 방법은 로봇의 말단부와 조립부품 사이에 스프링으로 구성된 기계적인 RCC(Remote Center Compliance) 장치를 장착하여 삽입을 용이하게 하는 방법[7]이다. 이 방법은 로봇제어기를 변경할 필요가 없는 장점이 있으나, 조립부품이 바뀌에 따라 RCC의 스프링 강성 및 구조를 변경해야 하며, 삽입 구멍이 모따기(chamfer) 처리가 되어 있어야 한다. 둘째로 능동적 컴플라이언스 방법은 로봇의 말단부(혹은 관절)에 힘/토크 센서를 장착하여 접촉력을 측정하여 이를 직접 제어하거나 변위, 속도 혹은 관절 토크량으로 변환하여 제어함으로써 조립을 용이하게 하는 기법이다. 수동적 컴플라이언스 방법과 달리 부품의 교체에 따라 제어기의 컴플라이언스 파라미터만을 변경함

접수일자 : 1999. 3. 9, 수정완료 : 1999. 11. 17

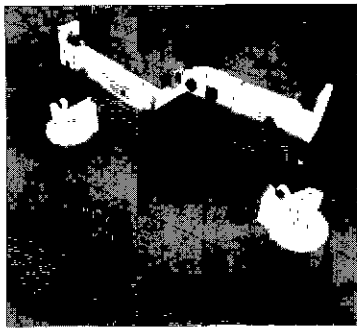
최종도 : 우리기술(주) 연구원

강성철, 김문상, 이종원 : 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터

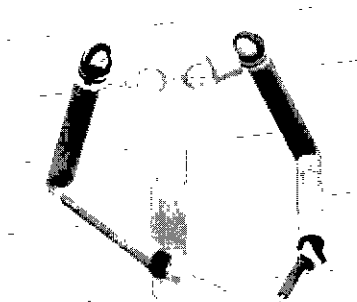
송제복 : 고려대학교 기계공학과



(a)



(b)



(c)

그림 1. 힘이 제한된 상태의 협력 (a) 이동, (b) 연마, (c) 조립.

Fig. 1. Force-constrained cooperation. (a) Transferring, (b) Polishing, (c) Assembly.

으로써 다양한 조립작업에 적용될 수 있는 유연성을 가지는 장점이 있다. 접촉력을 측정하는 능동적 컴플라이언스 기법을 기반으로 하는 제어기법은 그 동안 수많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. Whitnev[8]는 측정된 접촉력을 이용하여 삽입경로를 교정하는 순응성(accommodation) 제어기법(혹은 댐핑 제어기법)을 제안하였고, Salisburv[9]는 로봇 말단부가 원하는 직교 강성행렬(desired cartesian stiffness matrix)을 갖기 위한 관절 강성행렬(joint stiffness matrix)을 결정함으로써 능동 직교 강성제어(active cartesian stiffness control)기법을 제안하였다. 그 후 Hogan[10]은 말단부의 기계적인 임피던스 파라미터를 설계함으로써 접촉력 조절(modulation) 및 위치제어가 동

시에 가능한 임피던스 제어기법(impedance control)을 제안하였다. 이 방법은 임피던스 파라미터를 변경함으로써 고강성의 위치제어기와 저강성의 컴플라이언스 제어기를 동시에 설계할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 강성제어기에는 고려되지 않은 관성파라미터(inertial parameter)를 설계함으로써 고속의 동적 접촉운동(constrained motion)도 이론적으로 제어가 가능함을 보였다. 한편 접촉운동시의 힘 제어 방향과 위치제어 방향의 직교성(orthogonality) 혹은 상호성(reciprocity)에 기반을 둔 힘/위치 혼합제어기(hybrid force/position control)에 관한 연구[11-13]도 활발히 진행되었다. 그러나 이 방법은 접촉운동시 마찰력으로 인하여 힘제어 방향과 위치제어 방향의 직교성이 성립되지 않는 경우 선택행렬(selection matrix)의 지정이 어려운 단점을 가진다. 따라서 이 방법은 마찰이 적은 표면을 추종하는 접촉작업에 적합하다.

위에 일거한 대표적인 컴플라이언스 제어기법에 관한 연구들은 대부분 다양한 현대 제어이론을 도입하여 제어기의 성능을 개선하는 데 중점을 둔 것으로 주된 적용분야는 peg-in-hole 작업, 접촉표면 추종작업, 나사체결 작업, 크랭크 회전작업 등과 같이 작업경로가 1차원 또는 2차원인 극히 단순한 접촉작업에 국한되었다. 따라서 조립 부품의 형상이 복잡하거나 외부 환경의 형상이 알려져 있지 않은 복잡한 조립작업(CA: Complex Assembly)에 적용할 수 있는 조립기법에 관한 연구는 부족한 실정이며, 실제로 적용된 사례가 매우 적다[14,15]. 기존의 연구가 peg-in-hole 문제와 같은 단순 접촉 및 조립작업에 국한된 중요한 이유는 접촉상태에서의 접촉기구학(contact kinematics) 및 정역학적 해석이 충분히 이루어지지 않았기 때문이다. 즉, 기존의 연구는 접촉시 측정된 힘/토크 정보를 이용하여 주로 접촉력 제한조건과 기본 삽입경로(nominal insertion path)에 대한 위치오차 감소조건을 만족하는 제어기에 중점을 두었으나, CA 문제의 경우에는 위치오차 감소조건 대신 목표위치 접근조건(target approachable condition)을 만족하는 문제로 접근하는 방법이 유력하다[16]. 목표위치 접근 조건이란 현재의 접촉상태를 유지하면서(혹은 비접촉으로) 최종위치로 향하고자 하는 조건이다. 스crew 이론(screw theory)[17,18]에 의하면 강체가 접촉시 가지는 자유도는 repelling 조건 혹은 reciprocal 조건에 의해 결정된다. 따라서 접촉시 repelling 조건과 reciprocal 조건에 의한 부등식 구속조건(inequality constraints)을 만족하고 현재위치와 목표위치 간의 오차를 최소화하는 방향벡터를 최적화 알고리즘을 이용하여 계산함으로써 CA를 가능하게 하는 것이 적응 순응적 힘-가이드 제어이론의 중요한 아이디어이다. 본 논문에서는 전술한 힘-가이드 제어이론을 두 팔 협동 조립에 적용함으로써 다양한 인간형 조립작업에 적용 가능함을 보이고자 하였다.

개괄적인 조립 알고리즘은 그림 2의 블록선도와 같다. 조립 목표위치가 주어지면 조립 대상 부품들간의 힘을 고려하여 결정된 미소 트위스트(선속도와 각속도로 이루어진 벡터)로부터 두 팔의 역기구학 해를 구하게 되는데, 그

과정은 먼저 두 팔 로봇을 연결된 한 팔 로봇으로 재구성하여 한쪽 팔의 말단부 좌표계를 기준 좌표계로 하고 다른 팔의 말단부까지의 상대 자코비안을 구한 후, 의사역행렬(pseudo-inverse)과 전위함수의 구배를 이용하여 관절각 변위를 구하는 단계를 거치게 된다. 본 논문에서는 제안된 상대 운동 조립(혹은 삽입) 알고리즘의 타당성을 검토하기 위하여 KIST에서 개발된 인간형 로봇 Centaur 상체의 1차 버전을 이용하여 3차원적으로 구부러진 핀을 두 팔로 삽입하는 작업에 대한 시물레이션 및 실험을 수행하였다.

본 논문은 다음의 순서로 구성된다. 먼저 II장에서는 양팔 작업을 위한 역기구학 문제를 상대 자코비안을 이용한 방법으로 접근하며, III장에서는 적응 순응적 힘-가이드 제어 이론에 따라서 제어기를 설계하고, IV장에서는 제안된 알고리즘을 사용하여 시물레이션 및 실험을 수행한 결과를 살펴보고, V 장에서는 최종적으로 인간형 양팔 조립 실험을 수행한 결과에 대해서 고찰 및 결론을 도출한다.

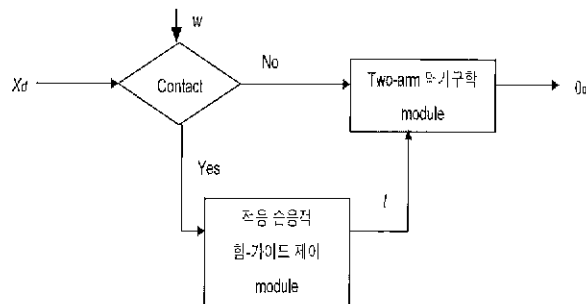


그림 2. 두팔작업에 의한 조립.

Fig. 2. Two arm assembly.

II. 상대 자코비안을 이용한 양팔 역기구학

1. 상대 자코비안

로봇의 관절 변수 θ 에서 말단 장치의 작업 변수 x 로의 사상(mapping) $f: R^n \rightarrow R^m$ 은 일반적으로 비선형 관계식을 이루고 있으므로 (1)과 같은 미분 기구학을 이용하여 표시한다.

$$\dot{x} = J(\theta) \dot{\theta} \tag{1}$$

여기서 x 은 말단 장치의 속도를 나타내고, θ 은 관절의 속도를 나타낸다. 또한 $J(\theta)$ 는 자코비안 행렬을 나타낸다. 자코비안 행렬은 각속도 합 법칙과 관절 속도의 전파(propagation)를 이용하여 비해석적 방법으로 구할 수 있는데 이를 양팔에도 적용할 수 있다[1] 이 방법은 각 팔에 대하여 독립적으로 작업을 계획하는 것에 비하여 상대적인 작업 변수만을 이용하여 양팔의 작업을 편리하게 기술할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 여러 가지 상대자코비안 유도방법들[1,2,19] 중 Akura[1]의 방법에 의해 상대자코비안을 구하였다.

먼저 기구학 계산을 위한 기호를 정의하면 다음과 같다.

θ : 매니플레이터 A의 관절 변수.

q : 매니플레이터 B의 관절 변수

G : 그리퍼(gripper) 좌표계

T : 공구(tool) 좌표계

obj : 그리퍼가 잡고 있는 물체, Fig. 3에서 펙에 해당

${}^k r_j$: k 좌표계에 대한 j 좌표계의 위치벡터.

${}^k R_j$: k 좌표계에 대한 j 좌표계의 회전행렬.

${}^k \omega_j$: k 좌표계에 대한 j 좌표계의 각속도벡터.

그림 3.에서 기준 좌표계에 대한 공구 좌표계의 위치벡터와 각속도벡터는 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다

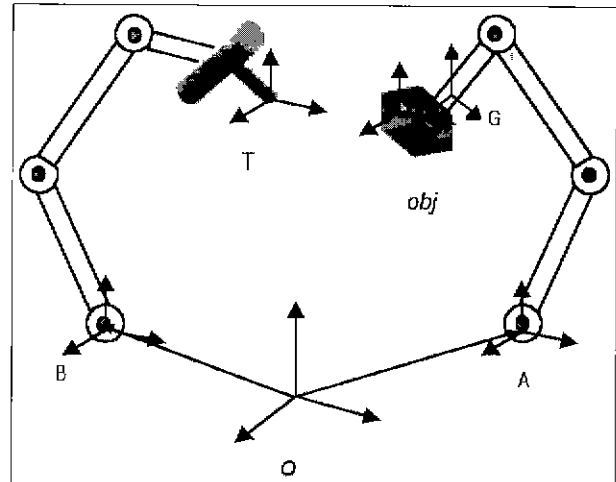


그림 3. 두팔의 기구학.

Fig. 3 Kinematics of two arms.

$${}^0 r_T = {}^0 r_A + {}^0 R_A {}^A r_G(\theta) + {}^0 R_A {}^A R_G(\theta) {}^G r_{obj} + {}^0 R_A {}^A R_G(\theta) {}^G R_{obj} {}^{obj} r_T = {}^0 r_B + {}^0 R_B {}^B r_T(q) \tag{2}$$

$${}^0 \omega_T = {}^0 \omega_A + {}^0 R_A {}^A \omega_G + {}^0 R_A {}^A R_G(\theta) {}^G \omega_{obj} + {}^0 R_A {}^A R_G(\theta) {}^G R_{obj} {}^{obj} \omega_T = {}^0 \omega_B + {}^0 R_B {}^B \omega_T \tag{3}$$

여기서 식을 간략화하기 위해 행렬 연산자를 (4)로 정의한다.

$$\bar{A} = [\times a] = \begin{bmatrix} 0 & a_3 & -a_2 \\ -a_3 & 0 & a_1 \\ a_2 & -a_1 & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

where $a = [a_1, a_2, a_3]^T$

또한 각 매니플레이터에 대하여 (5)의 관계가 성립한다.

$${}^1 r_G(\theta) = J_{a'}(\theta) \theta \quad {}^A \omega_G = J_{b'}(\theta) \dot{\theta}$$

$${}^B r_T(q) = J_{r'}(q) q \quad {}^B \omega_T = J_{\dot{r}'}(q) \dot{q} \tag{5}$$

(5)를 작업변수 ${}^{obj} r_T$ 에 대해 정리하고 미분하면 (6)의 관계식을 얻을 수 있다

$$\begin{bmatrix} {}^{obj} \dot{r}_T \\ {}^{obj} \omega_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \tag{6}$$

where

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= -{}^{ob}R_G [{}^A R_G^T(\theta) J_{R(\theta)} + {}^A \bar{R}_{BA}(\theta) {}^A R_G^T(\theta) J_{u\phi}(\theta) \\
 &+ {}^A \bar{R}_T(\theta, q) {}^A R_G^T(\theta) J_{R\phi}(\theta) - {}^A \bar{R}_G(\theta) {}^A R_G^T(\theta) J_{u\phi}(\theta)] \\
 J_{12} &= {}^{ob}R_G {}^A R_G^T(\theta) {}^A R_A^T {}^0 R_B J_{f_r}(\theta) \\
 J_{21} &= -{}^{ob}R_G {}^A R_G^T(\theta) J_{u\phi}(\theta) \\
 J_{22} &= {}^{ob}R_G {}^A R_G^T(\theta) {}^A R_A^T {}^0 R_B J_{f\phi}(\theta)
 \end{aligned}$$

(6)에서 얻어진 상대 자코비안은 두 대의 로봇을 연결된 하나의 로봇으로 재구성하여 한쪽 팔의 말단부에서 관측되는 다른 쪽 팔의 말단부 속도와 관절속도간의 매핑(mapping)이다.

2. 미소 변위에 대한 선형화 방법을 이용한 역기구학 해의 결정

(6)은 다음 (7)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} {}^{ob} \dot{r}_T \\ {}^{ob} \omega_T \end{bmatrix} = J(\theta, q) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7)의 일반적 해는 다음 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = J^+(\theta, q) \begin{bmatrix} {}^{ob} \dot{r}_T \\ {}^{ob} \omega_T \end{bmatrix} + (I - J^+(\theta, q) J(\theta, q)) y \quad (8)$$

where $J^+ = J^T (JJ^T)^{-1}$

여기서 $J^+(\theta, q)$ 는 최소 자승해(least square solution)를 의미하는 의사 역행렬(J^+ : pseudo inverse)을 나타내고 y 는 영속도 벡터(null motion vector)를 나타낸다. 여기서 y 를 전위함수의 구배(gradient)로 치환함으로써 관절각 제한 조건을 극복하는 역기구학 해를 구할 수 있다.

전위함수(potential function) 방법은 경로 계획[20]에서 쓰이는 방법 중의 하나로서 질점이 전위장(potential field)에 구속되어있고 장애물이 존재할 때, 목표점 방향으로 인력(attractive force)을 주는 전위함수를 주고 장애물 주변에는 척력(repulsive force)을 주는 전위함수를 부가하고 (9)의 관계를 이용하여 충돌을 방지하며 목표점에 도달할 수 있는 궤적을 생성하는 방법이다.

$$F = -\nabla V \quad (9)$$

여기서, F 는 인력 또는 척력의 함수이고, ∇V 는 전위함수의 구배(gradient)를 말한다.

질점이 아닌 관절을 가진 매니플레이터의 경우에는, 그림 4와 같이 관절각이 제한각의 값에 가까워지면 무한대의 값을 갖도록 하는 전위함수로서 (9)의 관계식을 이용하면 제한각의 범위내에서 역기구학 해를 구하는 것이 가능해진다. 본 논문에서는 (10)과 같은 전위함수를 사용하였다.

$$V_{joint} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 - \theta_{i, norm}^2} \right) \quad (10)$$

$$\text{where } \theta_{i, norm} = \frac{\theta_i - (\theta_{i, max} + \theta_{i, min})/2}{(\theta_{i, max} - \theta_{i, min})/2}$$

(10)에서 $\theta_{i, norm}$ 은 -1에서 +1까지의 값을 가지게 되며, 이때 V_{joint} 는 각 관절값이 관절각 제한값에 가까우면 Fig. 4와 같이 무한대로 증가하게 된다. 이때의 전위함수를 편미분하면 (11)과 같다.

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = \frac{\theta_{i, norm}}{(1 - (\theta_{i, norm})^2)^2} \frac{4}{(\theta_{i, max} - \theta_{i, min})} \quad (11)$$

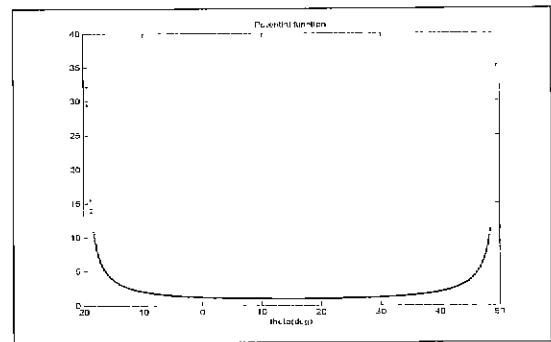


그림 4. 척력권위 함수의 예.

Fig. 4 Example of repulsive potential function ($\theta_{i, max} = 50^\circ$, $\theta_{i, min} = -20^\circ$).

결과적으로 (11)을 (8)의 y 에 대입하면 (12)와 같은 역기구학 해를 구할 수 있다. 여기서 k 는 가중치로서 상수이다. 관절이 boundary 근처값을 가지게 되면 gradient가 큰값을 갖게 되어 k 의 값이 중요한 역할을 하게 되는데 k 를 정하는 방법은 여러 가지가 있었으나 본 논문에서는 경험적 방법에 의해 결정하였다. 또 [21]에서와 같이 관절값의 변화에 따라 가변적으로 바꾸는 방법도 있다.

$$\dot{\theta} = J^+(\theta) \dot{t} + (I - J^+(\theta) J(\theta)) (-k \frac{\partial V}{\partial \theta}) \quad (12)$$

$$\text{where } \theta = \begin{bmatrix} \theta \\ q \end{bmatrix}, \quad \dot{t} = \begin{bmatrix} {}^{ob} \dot{r}_T \\ {}^{ob} \omega_T \end{bmatrix}$$

또한, (12)는 미소 변위에 대하여 (13)과 같다.

$$\Delta \theta = J^+ \Delta X + (I - J^+ J) (-k \frac{\partial V}{\partial \theta}) \quad (13)$$

샘플링 주기에 따라 해를 구하고 (14)와 같이 보간 하면 연속적인 역기구학해를 구할 수 있다

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta \theta \quad (14)$$

III. 적응 순응적 힘-가이드 제어기

적응 순응적 힘-가이드 제어 알고리즘(CA algorithm)은 운동 계획(motion planning) 및 조립 대상 부품의 기하

학적 형상에 관계없이 조립 작업을 수행하기 위해 개발된 기법이다[16]. 또한 CA 알고리즘은 Asada[22]가 밝힌 바 있는 다중 접촉 상태(multi contact state)에서의 힘과 속도와의 비선형적 관계를 비선형 최적화방법(nonlinear optimization)을 적용하여 해결하였으며, 조립 대상 부품에 가해지는 과도한 힘과 재밍(jamming), 웨징(wedging) 등의 현상을 효과적으로 방지한다. 1, 2절에서는 이러한 특징을 갖는 CA 알고리즘에 대해 설명하고 3절에서는 이를 이용하여 제어기를 설계한다

1. CA를 위한 볼록 최적화(convex optimization)

Reciprocal과 repelling 조건을 만족하고 방향 오차(direction error)를 최소화하는 트위스트(twist : 선속도와 각속도)를 목표위치 접근 트위스트(target approaching twist)라 한다[16]. 나사이론(screw theory)에 따르면 reciprocal과 repelling 조건은 접촉상태에서 운동 가능 공간(admissible motion space)을 의미하며 접촉렌치(contact wrench: 힘과 모멘트) w 와 미소 트위스트 t 로 (15)와 같이 나타낸다.

$$g(t) = -w^T t \leq 0, \tag{15}$$

where $w = (f_x, f_y, f_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z)^T$ and $t = (v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$.

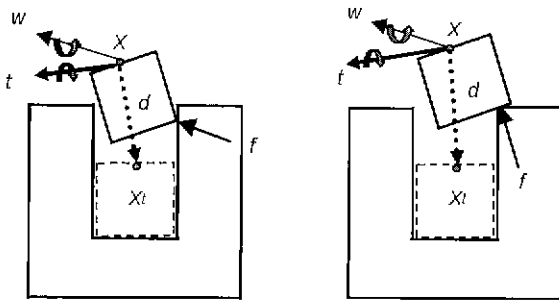


그림 5. 최적 트위스트. (a) 리펠링운동, (b) 레시프로컬 운동

Fig. 5 Optimum twist. (a) repelling motion, (b) reciprocal motion.

최적화의 목적함수 $f(t)$ 는 그림 5에서 현재위치를 나타내는 X 와 목표위치를 나타내는 X_i 간의 차와 목표속도 (V_d, Ω_d)로부터 결정되는 목표 트위스트(target twist) d 와 미소 트위스트 t 와의 차의 놈(norm)값의 제곱의 절반으로 나타낸다 이것이 (16)이다.

$$f(t) = \frac{1}{2} \|d - t\|^2. \tag{16}$$

where $d = (v_{dx}, v_{dy}, v_{dz}, \omega_{dx}, \omega_{dy}, \omega_{dz})$,
 $v_d = (P_i - P) / \|P_i - P\| \cdot V_a$
 $\omega_d = (O_i - O) / \|O_i - O\| \cdot \Omega_d$
 $X = (P^T, O^T)$

$$P^T = (x, y, z)^T \text{ and } O^T = (\alpha, \beta, \gamma)^T$$

목적함수 $f(t)$ 와 제약조건 $g(t)$ 는 헤시안(hessian)이 양반정(positive semi-definite)행렬이므로 볼록 함수(convex function)가 되어 각 접촉상태에서 전역적 최적해(global optimum)가 존재한다[23]. 부등호 제약조건을 갖는 최적화 문제의 라그랑지 함수 L 은 다음 (17)과 같다.

$$L = f(t) + u \cdot g(t) \tag{17}$$

(17)에 Kuhn Tucker 조건을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial t} + u^* \frac{\partial g}{\partial t} = 0 \tag{18}$$

$$g(t^*) \leq 0, \tag{19}$$

$$u^* \cdot g(t^*) = 0 \text{ and} \tag{20}$$

$$u^* \geq 0 \tag{21}$$

(20)의 조건은 $u^* = 0$ 인 경우와 $g(t^*) = 0$ 로 나뉘는데, 먼저 $u^* = 0$ 인 경우는 그림 5의 (a)에 해당되는데, 가해진 렌치가 펙의 목표위치 접근을 구속하지 않는 상태를 나타낸다 이때 펙은 repelling 운동이 가능하며 최적트위스트는 (22)와 같다.

$$t^* = d \tag{22}$$

두 번째는 $g(t^*) = 0$ 인 경우로서 최적트위스트는 (18)~(21)을 연립하여 (23)으로 결정되며 가해진 렌치가 그림 5(b)와 같이 운동을 구속하는 상태를 나타낸다.

$$t^* = d + u^* \cdot w \tag{23}$$

where $u^* = -w^T d / \|w\|^2$

라그랑지 승수 u^* 는 렌치와 트위스트간의 매핑(mapping)으로서 목표 트위스트와 렌치의 변화에 따라 동적으로 변한다. 따라서 이를 순응성 지수(accommodation index)라 하고, 이 기법을 기존의 렌치와 트위스트간의 선형적이고 확정적(determined)인 순응성 법칙들과 구별하여 적용 순응성 법칙(adaptive accommodation law)이라 한다[24].

2. 교란(perturbation)

CA 알고리즘에서는 다중 접촉 상태에서 합렌치(resultant wrench)를 이용하여 물체에 가해진 힘과 모멘트를 구하므로 결정된 트위스트가 실제 운동가능공간(admissible motion space)이 아닌 운동이 불가능한공간의 트위스트가 최적트위스트로 결정될 수 있다. 이때는 실제 운동이 불가능한 공간으로의 트위스트가 발생됨으로 인해 부품에 과도한 렌치가 가해져 심한 경우 부품의 손상이 생길 수도 있다 이런 경우뿐만 아니라 재밍(또는 웨징)

현상을 방지하기 위해서도 교란(perturbation) 기법이 필요하다. 본 논문에서의 교란 벡터는 [16]에서 제안된 (24)를 이용하여 결정된다.

$$\begin{aligned} \delta_v &= \text{diag}(C_v, C_v, C_v)f \\ \delta_\omega &= \text{diag}(C_\omega, C_\omega, C_\omega)\tau \end{aligned} \quad (24)$$

where $f=(f_x, f_y, f_z)$, $\tau=(\tau_x, \tau_y, \tau_z)$

여기서 $\text{diag}(C_v, C_v, C_v)$ 는 C_v 로 이루어진 대각행렬이며, C_v, C_ω 는 접촉렌치 제한 조건을 만족하도록 설계된 계수로서 일반적인 강성제어법칙(stiffness control law)에서 사용되는 선형강성(translational stiffness) K_v , 회전강성(rotational stiffness) K_ω 및 샘플링 시간 T_s 로부터 (25)와 같이 결정된다

$$C_v = \frac{1}{K_v T_s}, \quad C_\omega = \frac{1}{K_\omega T_s} \quad (25)$$

3 적응 순응성을 갖는 양팔 조립 힘-가이드 제어기

그림 6은 제어의 흐름을 나타내는 그림으로서 목표위치가 입력으로 주어지면 최적 트위스트 생성 부분과 양팔 역기구학 부분으로 이루어진 양팔 조립 모듈을 거쳐 위치제어기로 양팔을 제어하는 순서로 구성됨을 보여준다. 전체적인 제어 구조는 기존의 위치제어기에 접촉시 측정된 힘을 피드백한 루프가 추가된 형태로 나타난다. 또한 본 제어기의 안정성과 연속성은 현재 진행 중인 연구로서 추후에 발표될 예정이다

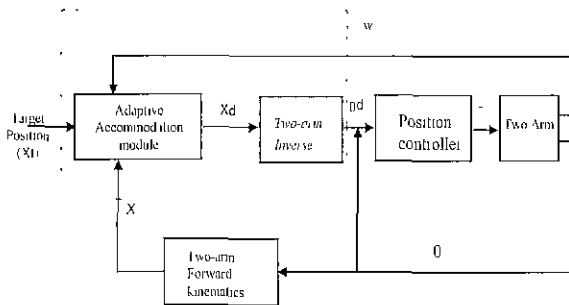


그림 6. 제어 알고리즘 개략도.
Fig 6. Control algorithm schematic diagram.

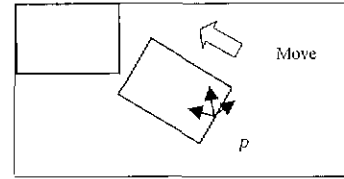
IV. 시뮬레이션

앞 장에서는 양팔 조립 알고리즘을 구성하는 두가지 주된 내용에 대해서 설명하였다. IV장에서는 이를 이용한 실험에 앞서 그래픽 시뮬레이션을 수행하였다. 실험과 달리 그래픽 시뮬레이션에서는 힘이나 모멘트를 측정할 수 없으므로 본 연구에서는 강체간의 거리를 계속 계산하여 서로 파고들었을 경우 파고든 깊이에 물체의 강성을 곱하여 힘의 측정 모델로 이용하였다.

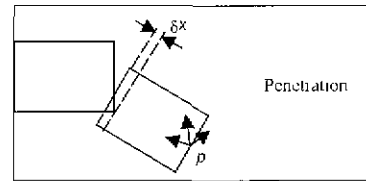
1. 힘 측정 모델

본 논문에서는 조립 시뮬레이션을 위해서 접촉시 발생

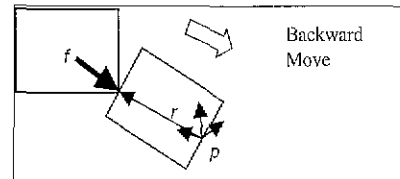
하는 렌치를 계산하기 위한 렌치 측정 모델을 개발하였다. 접촉 렌치를 계산하기 위해서는 먼저 물체간의 최단거리를 계산할 필요가 있는데, 3차원상의 거리계산 알고리즘인 Gilbert[25]의 알고리즘을 사용하였다. 일반적인 최소거리 계산 알고리즘은 물체가 파고든 경우 최소거리를 0으로 계산하므로, 그림 7에서처럼 최소거리가 처음 0이 되는 순간은 실제 물체가 파고든 순간이다 이 순간에 전 단계의 최



(a)



(b)



(c)

그림 7 렌치측정모델. (a) 최소변위 $d \neq 0$, (b) 최소변위 $d=0$, (c) 역방향 마소운동 $d \neq 0$ 까지.

Fig 7. Wrench sensing model. (a) minimum distance $d \neq 0$, (b) minimum distance $d=0$, (c) backward fine move until $d \neq 0$.

단거리 벡터의 역방향으로 물체를 더욱 미소한 간격으로 이동하여 최단거리가 0이 되는 순간까지의 변위를 파고든 깊이로 계산한다. 이 때의 변위에 물체의 강성 K 를 곱하면 (26)에서처럼 근사적인 힘이 결정된다. 또한 (27)에서처럼 기준 좌표계에서의 위치벡터 r 과의 외적을 통해 모멘트도 결정할 수 있다.

$$F = K\delta x \quad (26)$$

$$\tau = r \times f \quad (27)$$

여기서 힘 f 와 모멘트 τ 로 렌치 벡터를 구성하고, 만약 물체가 다중 접촉상태일 경우의 합렌치 벡터 W 는 각 접촉력의 합력으로 (28)과 같이 계산된다.

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \quad (28)$$

2 인간형 로봇을 이용한 구부러진 핀의 삽입

그림 8의 로봇은 각각 8자유도를 갖는 인간형 로봇팔로서 KIST에서 개발된 CENTAUR 상체부의 기구학 계수로부터 구성하였다. 표 1은 CENTAUR 양팔의 기구학 보정 과정을 통하여 결정된 D-H(Denavit Hartenberg)에 의한 실제 기구학 계수이다[26]. (a)에서 (d)까지의 그림은 구부러진 핀을 삽입하는 과정을 나타낸다. 삽입작업은 표 2의 조건하에서 이루어졌다.

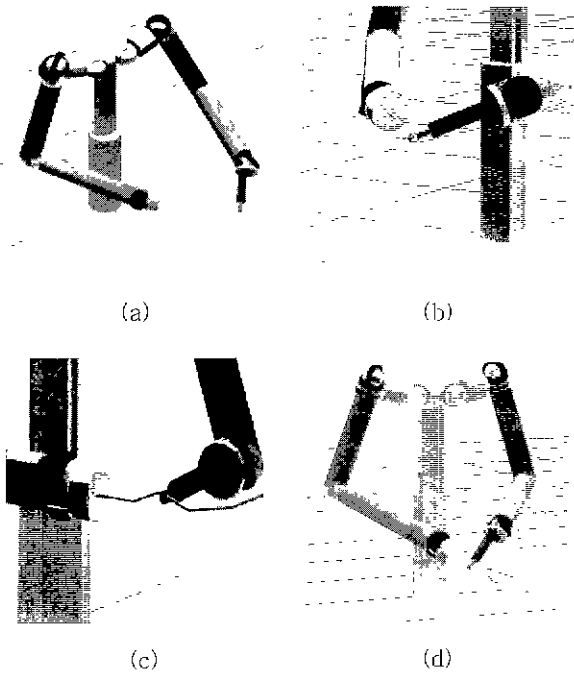
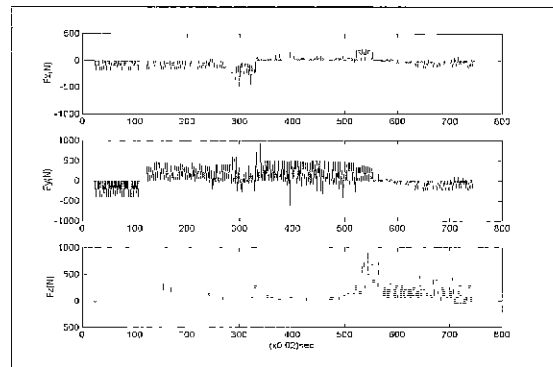


그림 8. 구부러진 핀의 삽입과정.
Fig. 8. Bent pin insertion process.

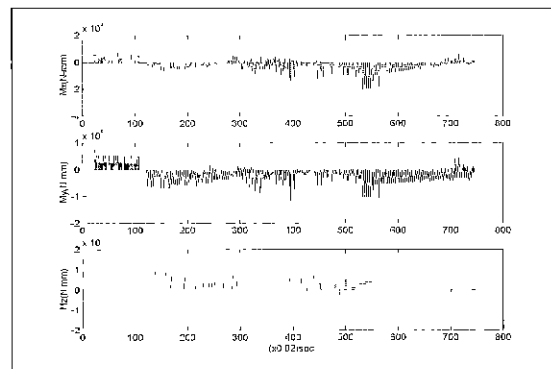
표 1. 센토의 기구학 계수

Table 1. Kinematic parameters of CENTAUR

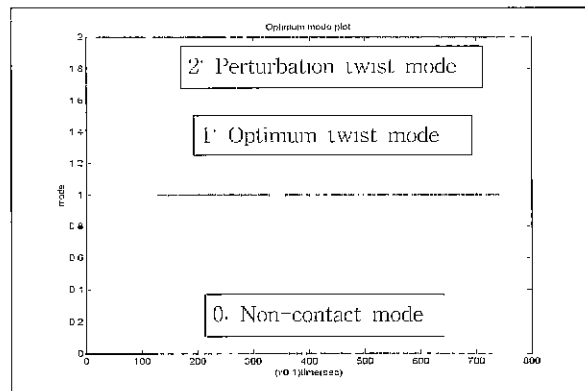
Link	a(mm)	d(mm)	α (degrcc)	θ offset (degree)	
Left arm	1	3.67	0	-92.85	-180
	2	25.45	-119.2	-49.37	85.76
	3	1.82	171.09	89.55	82.19
	4	-6.3	-333.62	89.83	129.70
	5	2.58	0.09	89.05	94.51
	6	-0.82	-335.74	-73.19	2.54
	7	-1.95	0.59	-90.45	90.15
	8	31.0	0	0	0
Right arm	1	4.57	0	89.19	-180
	2	24.84	131.48	44.59	89.08
	3	5.38	-184.21	-90.95	88.08
	4	-6.02	334.13	-90.38	134.66
	5	3.00	-0.14	-89.35	95.26
	6	-0.10	335.69	86.34	0.85
	7	-2.40	0.03	92.51	79.53
	8	32.0	0	0	0



(a)



(b)



(c)

그림 9. 측정된 렌치와 접촉상태. (a) 힘, (b) 모멘트, (c) 모드.

Fig. 9. Sensed wrench and contact mode (a) force (b) moment (c) mode.

이때 측정된 힘과 모멘트의 그래프가 Fig. 9의 (a)와 (b)이다. (c)는 매 순간의 모드를 나타낸 것이며 모드가 0이면 힘이 기준값 이하로 측정된 비접촉상태이고, 모드가 1이면 (22) 혹은 (23)에 의하여 최적 트위스트가 생성가능한 모드이며, 모드가 2이면 순응성 지수가 0보다 작거나, 과도 접촉력이 발생하여 (24)에 의해서 결정되는 교란 상태이다. 또한 본 시뮬레이션에서는 (8)에서의 y-패터를 0으로 하여

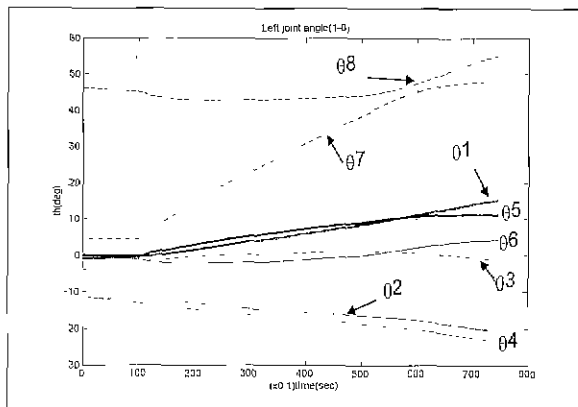
표 2. 구부러진 핀 삽입의 과제상세
Table 2 Task specification of bent pin insertion.

Simulation Environment	ENVISION ^{1.01} Silicon graphics Indigo WorkStation
Initial pose in Relative Coordinates(x,y,z,yaw,pit,rol)	49.67, 252.82, -16.92, 42.40, 178.76, 72.19 (mm mm mm degree degree degree)
Target pose in Relative coordinates(x,y,z,yaw,pit,rol)	49.54, 61.82, -16.23, 42.22, 178.62, 72.10 (mm mm mm degree degree degree)
Initial joint angle(degree) (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16)	-0.94 -11.96 -3.86 11.18 -0.01 0.34 4.68 46.29 -13.99 -11.91 -0.00 42.90 -4.46 20.05 3.29 16.60
Sampling Time	0.05 sec
Environment Stiffness	1000 N/mm
Desired Linear Velocity	10mm/sec
Desired Rotational Velocity	10degree/sec
Simulation time	76 sec
Peg diameter	6 mm
Hole diameter	10 mm

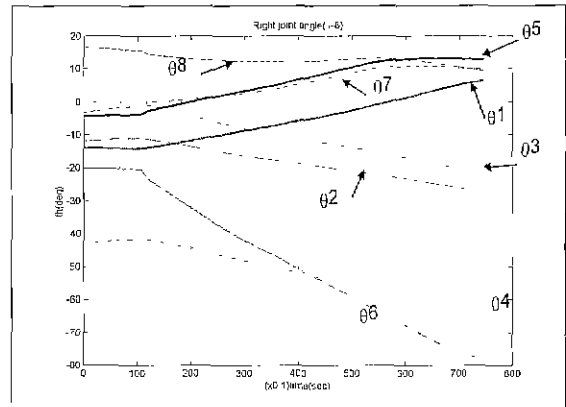
의사역행렬만으로 역기구학 해를 구하였으며 계산된 각 관절각은 Fig. 10의 (a), (b)와 같다.

V. 실험

실험에 사용된 인간형 로봇 CENTAUR상체는 각각 8자유도씩 두 팔을 갖는 여유 자유도 로봇이다. KIST에서는 이와 같이 관절의 수가 많은 로봇을 제어하기 위하여 VME-기반의 실시간 제어 시스템을 구축하였다. 이 제어 시스템은 상위의 운동 계획(motion planning) 모듈과 TCP/IP로 통신이 가능하고, 하부의 운동 서보제어기와



(a)



(b)

그림 10. 관절각 경로. (a) 왼쪽, (b) 오른쪽
Fig. 10. Joint angle trajectory. (a) Left, (b) Right.

DP-RAM(Dual Port RAM)을 통하여 공유 메모리(shared-memory) 방식으로 통신한다. 운동 제어시스템의 중심인 KVME040 CPU보드에서 VxWorks 실시간 제어 프로그램이 실행되고 이는 각종 명령어 실행, 상위의 운동 계획기와 인간과의 인터페이스, 하부 시스템 통제 등의 역할을 담당한다. TMS320C30 DSP 보드는 한 장의 보드가 로봇의 4개 관절위치를 제어하는 하위 서보제어기로서 사용되었다. 또한 KVME040 보드는 하위 서보제어기를 통제하고 운동을 계획하는 실시간 운영체제가 탑재된 보드로서 여러 DSP 보드와의 통신을 총괄하는 역할을 한다

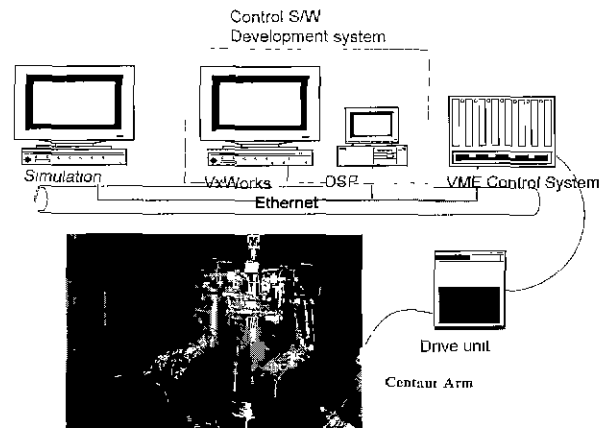


그림 11 센토랄 제어시스템.
Fig. 11. CENTAUR arm control system.

그림 11에서 로봇의 오른쪽 팔의 말단부에 장착된 Force 센서 JRS는 힘이 가해지면 비례 전압을 발생시키고 연결된 DSP 보드의 ADC(Analog to Digital Converter) 채널을 통하여 이를 디지털화하는 구조로 되어있다. 그림 11은 전체 제어 시스템을 나타내는 그림이고, 그림 12, 13은 실험을 위해 제작된 구부러진 핀과 구멍의 실제 사진이고 로봇의 기구학 계수는 표 1.과 같다.

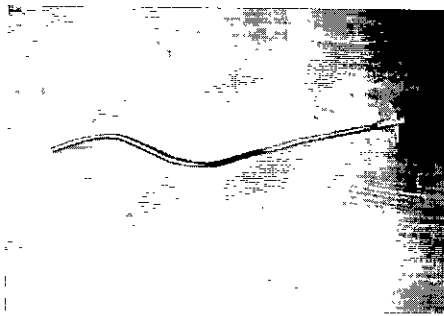


그림 12. 구부러진 핀.
Fig. 12. Bent pin.

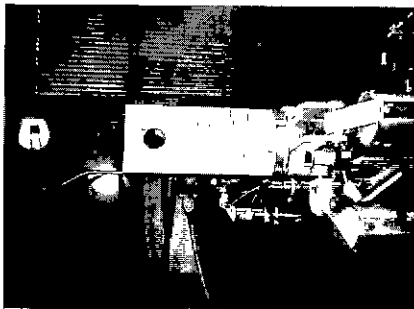


그림 13. 구멍.
Fig. 13. Hole.

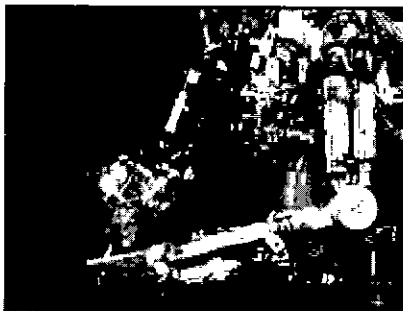


그림 14. 구부러진 핀의 삽입.
Fig. 14. Bent pin insertion.

그림 14는 구부러진 핀을 삽입하는 실험사진이고, 그림 15는 삽입 중에 모드의 변화를 나타내는 그래프로서 모드가 0인 경우는 접촉력이 매우 작거나 없어서 위치제어만 수행하는 경우이고, 모드가 1일 때는 최적 트위스트 생성 모드이며, 모드가 2일 경우는 교란이 일어나는 경우를 나타낸다. 또한, 그림 16, 17은 구부러진 핀을 구멍에 삽입하는 작업 중에 측정된 렌치의 성분들을 나타내는 그래프이다.

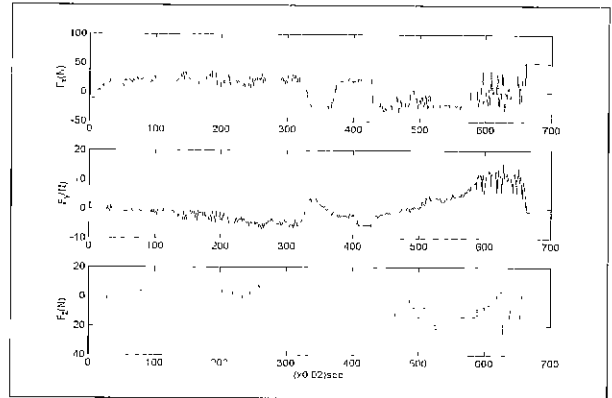


그림 16 측정된 힘 도표.
Fig. 16 Sensed force plot.

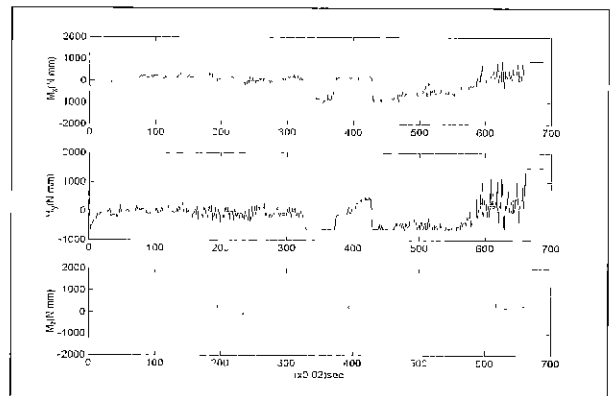


그림 17 측정된 모멘트 도표.
Fig. 17 Sensed moment plot.

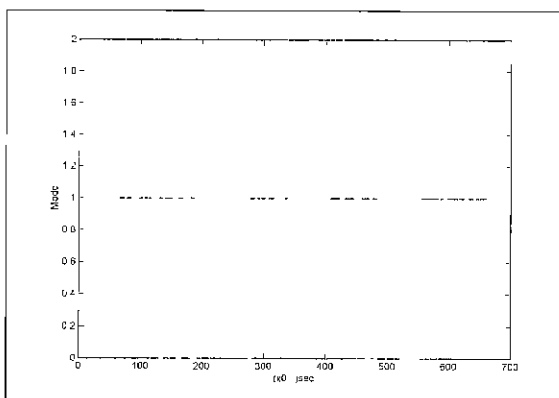


그림 15. 최적 모드 도표(실험).
Fig. 15. Optimum mode plot(experiment).

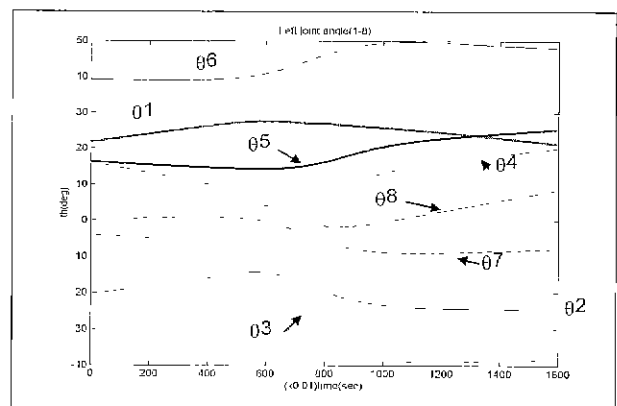


그림 18. 왼쪽팔 관절각.
Fig. 18. Left arm joint angle.

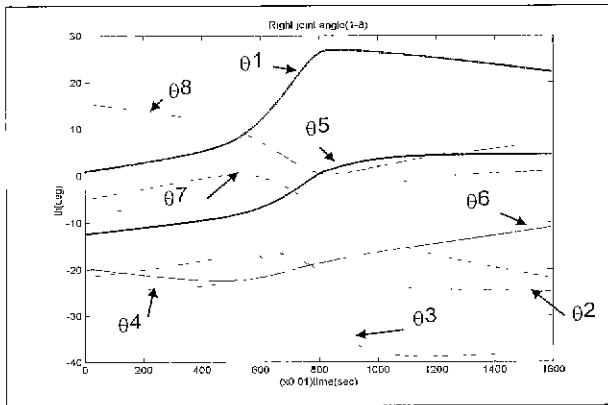


그림 19. 오른쪽팔 관절각.
Fig. 19 Right arm joint angle

그림 18, 19는 로봇이 표 3.의 제한각 내에서 구부러진 핀을 삽입하는 과정에서 측정된 관절각 값을 나타내는데, 전위함수의 구배를 이용한 관절각 제한 방법이 적절히 작용하여 제한 범위내에서 움직였음을 관찰할 수 있다. 실험에서의 결과는 핀을 구부리는 위치와 각도가 시뮬레이션과 같이 재현하기 어려운 제작상의 문제로 다른 양상을 보이고 있다. 또한 이는 본 논문의 방법이 일반성을 갖는다는 것을 역으로 반증하는 예라 할 수 있다.

표 3. 센토의 관절제한
Table 3. Joint limits of Centaur.

Joint	Lower limit (degree)	Upper limit (degree)
1	-9	45
2	-48	-0.5
3	-70	5
4	55	115
5	-32	86
6	-180	180
7	-50	27
8	-32	41

V. 결론

본 연구에서는 두 대의 로봇 또는 양팔 로봇이 서로 상대운동을 통하여 부품을 삽입(또는 조립)하고자 하는 목적으로 접촉 운동 또는 비접촉 운동을 동시에 수행할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 먼저, 접촉작업에 이용되는 힘 제어 알고리즘 중, 복잡한 형상 부품을 기하학적 정보 없이 조립가능하고, 다차원 운동이 가능하며, 조립시 발생하는 다수 접촉상태에서 제밍(또는 웨징) 현상을 효과적으로 극복하기 위하여 적응 순응적 힘-가이드 제어기법을 이용하였다. 또한, 양팔의 상대 운동을 발생하기 위하여 상대 자코비안을 이용한 미소 변위 역기구학 방법을 이용하였으며, 관절각 제한 조건을 극복하기 위하여 가상적인 반발력 효과를 주는 전위함수의 구배를 사용하였다.

제안된 방법은 KIST에서 개발된 인간형 로봇 CENTAUR 1차 버전의 실제 기구학 계수에 근거하여 3차원적으로 구부러진 핀을 구멍에 삽입하는 시뮬레이션 및 실험을 수행함으로써 평면 조립 작업뿐만 아니라, 다차원 운동을 갖는 복잡 부품의 삽입에도 적용가능하다는 점을 보였다. 아울러 제시된 알고리즘의 타당성을 입증하였을 뿐만 아니라, 두 팔을 사용하는 인간형 조립작업을 구현하였다.

참고문헌

- [1] M. Akira, Y. Motoji, and H. Go "Cooperative path planning for two manipulators." *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 2853-2858, 1996
- [2] C. L. Lewis. "Trajectory generation for two robots cooperating to perform a task." *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 1626-1631, 1996.
- [3] S. A. Schneider, R. H. Cannon, Jr, "Object impedance control for cooperative manipulation : theory and experimental results." *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 3, pp. 383-394, 1992
- [4] S. G. Tzafestas, *Robotic Systems : Advanced Techniques and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1992
- [5] G. Duelen, H. Munch, and Y. Zang. "Intelligent programming of force-constrained cooperating robots," *Journal of Robotic Systems*, vol. 15, pp. 469-477, 1994
- [6] S. J. Gordon and W. P. Seering, "Programmable tools for flexible assembly systems," *Proc. ASME International Computers in Engineering Conf. and Exhibition*, Boston, pp. 239-245, 1985.
- [7] D. E. Whitney, "Quasi static assembly of compliantly supported rigid parts," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 104, March, pp. 65-77, 1982.
- [8] D. E. Whitney. "Force feedback control of manipulator fine motions," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 99, no. 2, pp. 91-97, 1977.
- [9] J. K. Salisbury, "Active stiffness control of a manipulator in Cartesian coordinates." *Proc. of the 19th IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 95-100, 1980.
- [10] N. Hogan, "Impedance control: an approach to manipulation: part III-applications," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 107, March, pp. 17-24, 1985.
- [11] M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulator," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 102, March, pp. 126-133, 1981.
- [12] M. Mason. "Compliance and force control for

computer controlled manipulators," *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-25, pp 468-474, 1980.

[13] A. A. Goldenberg, and P Song, "Analysis and design of position/force controllers Part I,II," *Workshop3 of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation: Force and Contact Control in Robotic Operation : Theory and Applications*, pp. 2-1-2-60, 1996.

[14] K. S. Chul, K. I. Lee, Y. K Hwang, M. S. Kim, and Ch. W. Lee, "A compliant motion control for insertion of complex shaped objects using contact." *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 841-846, 1997.

[15] David R. Strip, "Insertions using geometric analysis and hybrid force-position control: Method and analysis," *Proc of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1744-1751, 1988.

[16] S. Kang, M. Kim, C. W. Lee, and K. I Lee, "A target approachable force-guided control for complex assembly." *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 826-831, 1998.

[17] R. S. Ball, *A treatise on the Theory of Screws*, Cambridge University Press, Cambridge, 1900

[18] K. H. Hunt, *Kinematic Geometry of Mechanisms*, Clarendon, Oxford, 1978

[19] Chiacchio P, Chiaverini S, Siciliano B. "Direct and inverse kinematics for coordinated motion tasks

of a two-manipulator system," *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control-Trans. of the ASME*, vol 118 no. 4, pp. 483-494, 1996.

[20] Latombe, J.C. *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, 1991

[21] T. C. Liang and J. S. Liu, "An improved trajectory planner for redundant manipulators in constrained workspace." *The fifth International Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV '98)*, pp. 1341-1346, 1998

[22] H. Asada, "Teaching and learning of compliance using neural nets: representation and generation of nonlinear compliance," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 1237-1244, 1990.

[23] Arora, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, Singapore, 1989.

[24] E. G Gilbert, D. W. Johnson, and S. S. Keerthi, "A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol 4, no. 2, pp. 193-203, 1988.

[25] 강성철, "적응 순응성을 갖는 힘-가이드 제어에 관한 연구", 박사 학위 논문, 서울대 기계설계학과, 1998

[26] 최종도, 강성철, 김문상, 송재복, "인간형 로봇 CENTAUR 상체의 기구학적 보정", 제어계측-자동화-로보틱스 연구회 합동 학술 발표회, pp 127-130, 1998.



최종도

우리기술㈜ 연구원. 항공대학교 기계공학과 학사. 고려대학교 기계공학과 석사. 관심분야는 로보틱스 및 자동화



이종원

한국과학기술연구원(KIST) 휴먼로봇 연구센터 책임연구원 및 센터장. 서비스 로봇 기술사업단장. 서울대학교 기계공학과 학사. 미국 미네소타 주립대학 기계공학 석사, 박사. 관심분야는 로보틱스, CAD/CAM



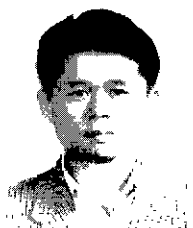
강성철

한국과학기술연구원(KIST) 휴먼로봇 연구센터 선임연구원. 서울대학교 기계설계학과 학사. 서울대학교 기계설계학과 석사. 서울대학교 기계설계학과 박사. 관심분야는 로보틱스 및 실시간 제어.



송재복

고려대학교 기계공학과 부교수. 서울대학교 기계공학과 학사. 서울대학교 기계설계학과 석사. 미국 MIT 기계공학과 박사



김문상

한국과학기술연구원(KIST) 휴먼로봇 연구센터 책임연구원. 서울대학교 기계설계학과 학사. 서울대학교 기계설계학과 석사. 독일 베를린 공대 기계공학과 Dr. Eng. 관심분야는 휴머노이드/서비스 로봇