

컨베이어 추적을 위한 로봇트 매니플레이터의 계층적 제어구조

박태형 이영대 이범희 고명삼
서울대학교 자동화 시스템 공동 연구소 및 제어계측공학과

A Hierarchical Control Structure of a Robot Manipulator for Conveyor Tracking

Tae-Hyung Park Young-Dae Lee Bum-Hee Lee Myoung-Sam Ko
Automation and Systems Research Institute and
Dept. of Control and Instrumentation Eng.
Seoul National University

Abstract

For the conveyor tracking application of a robot manipulator, a new control scheme is presented. The presented scheme is divided into two stages : the upper one is the motion planning stage and the lower one is the motion control stage. In the upper stage, the nominal trajectory which tracks the part moving in a constant velocity, is planned considering the robot arm dynamics. On the other hand, in the lower level, the perturbed trajectory is generated to track the variation in the velocity of conveyor belt via sensory feedback and the perturbed arm dynamics. In both stages, the conveyor tracking problem is formulated as an optimal tracking problem, and the torque constraints of a robot manipulator are taken into account. Simulation results are then presented and discussed.

1. 서 론

로봇트를 실제에 응용함에 있어서, 많은 작업이 로봇트와 컨베이어 벨트의 결합을 필요로 한다. 그러나 파트가 로봇트의 작업 공간으로 이송된 후 컨베이어가 정지된 상태에서 파트의 가공, 처리가 이루어지게 되면, 연속되는 전체 작업의 효율은 떨어지게 된다. 컨베이어 추적은 이러한 문제점을 극복하는 방법으로서, 용접, 페인팅, 실링(sealing)등의 많은 로봇트 응용 분야에 실제 적용되고있다. [1]

컨베이어의 추적 작업의 성능 향상을 위하여, 로봇트 매니플레이터는 다음의 조건들을 고려하여 제어되어야한다. 우선 로봇트 핸드의 파트에 대한 작업은 상태 변화가 정해진 경계치 보다 작아지는 상태 (안정 상태 : steady state) 에서 수행된다. 안정 상태에서의 추적 오차는 작업의 정밀도에 직접 영향을 주므로 최소화 되어야 한다. 특히 컨베이어 벨트의 속도가 외란에 의하여 변하는 경우 이를 추적할 수 있는 능력이 부여 되어야 한다. 이 때 로봇트 매니플레이터의 토크 제한범위를 고려한 추적 궤적이 생성 되어야하며, 빠른 시간 내에 안정상태로 진입하여야 한다. 이상의 조건을 만족시키도록 로봇트 매니플레이터의 운동을 제어하는 것이 본 논문의 목적이다.

본 논문은 로봇트 매니플레이터의 컨베이어 추적 응용에 있어서, 그 유용성을 극대화하기 위한 새로운 제어 방법을 제안한다. 컨베이어 추적문제는 최적 제어 이론의 최적 추적 문제로 변환되며, 오프라인의 동작계획과 온라인의 동작제어의 계층적 제어구조에 의하여 로봇트를 제어한다. 동작 계획은 컨베

이어 벨트의 속도가 일정하다는 가정 하에, 로봇트의 전체 동적 방정식을 고려하여 동적 계획법(dynamic programming)에 의하여 이루어진다. 이 단계에서 발생된 로봇트의 정규궤적은 다음 단계인 동작 제어를 위하여 사용된다. 컨베이어의 속도 외란을 고려하는 경우, 정규궤적으로 부터 변이하여야하는 로봇트의 궤적은 선형 시변의 섭동방정식으로 표현된다. 여기에 선형시스템에서 잘 알려진 최적제어 기법을 적용하여 동작제어기를 구성한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 컨베이어 추적을 위한 동작 계획 방법을, 3 장에서는 동작 제어 방법을 논한다. 4 장에서는 시뮬레이션 결과를 제시하고 이를 분석한다.

2. 컨베이어 추적을 위한 동작 계획

2.1 컨베이어 추적 문제의 정의

본 논문에서 설정된 작업 시스템은 그림 1 과 같다. 컨베이어 벨트로 이송되는 파트와 파트의 운동 상태를 추적하는 로봇트 매니플레이터의 운동 과정을 나타내고 있다. 오프라인의 동작계획 단계에서는 추적 중의 컨베이어 벨트의 속도가 v_b 로 일정 하다고 가정한다. 카르테시안 좌표계에서의 파트의 위치 벡터를 $x_p(t)$ 라하면, 컨베이어 벨트 위에 놓여져 이송되는 파트의 운동 상태는 다음과 같다.

$$x_p(t) = v_b t - v_b t_0 + x_p(t_0) \quad t \geq t_0 \quad (1)$$

$$\dot{x}_p(t) = v_b \quad t \geq t_0 \quad (2)$$

추적 시작 시간 (t_0) 에서 로봇트 핸드는 파트의 직선 경로 상에 정지하여 있으며, 파트의 초기 위치 $x_p(t_0)$ 와 d 의 차이를 갖고 있다. d 를 초기 위치 편차라 정의 한다. 또한 로봇트 매니플레이터의 오리엔테이션은 파트의 오리엔테이션과 일치하며, 추적 진행 중 오리엔테이션의 변화는 없다고 가정한다. 카르테시안 좌표계에서의 로봇트 핸드의 위치 벡터를 $x_h(t)$ 라하면, 로봇트 핸드 운동의 초기 조건은 다음과 같다.

$$x_h(t_0) = x_p(t_0) + d \quad (3)$$

$$\dot{x}_h(t_0) = 0 \quad (4)$$

추적이 시작된 이후 파트는 등속 운동을 계속하고, 로봇트 핸드는 변속 운동을 하면서 파트를 추적한다. 로봇트 핸드의

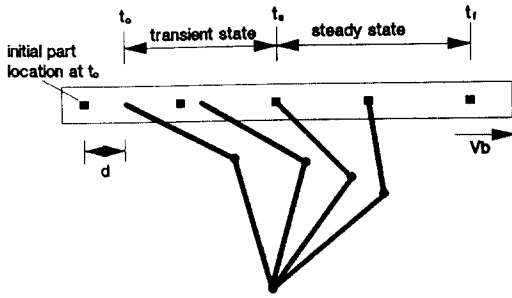


그림 1. 컨베이어 추적 문제의 정의

운동 상태 (위치, 속도)가 파트의 운동 상태와 일치 되기 시작 하는 시간을 정착시간 (settling time) 이라 정의하고, t_s 로 표기한다. 정착시간은 미리 설정되는 값이 아니며, 추적 궤적의 생성과 함께 결정 되어야 하는 값이다.

컨베이어 벨트에 대한 로봇트 매니플레이터의 추적 성능을 극대화하기 위하여, 동작 계획 단계에서는 다음의 사항들이 고려된다.

- (i) 안정상태 ($t \geq t_s$)에서의 변위와 속도 오차는 작업정밀도에 영향을 주므로 최소화되어야 한다.
- (ii) 안정상태로 진입하는 시간, 즉 정착시간은 작업 시간과 관계되므로 최소화되어야 한다.
- (iii) 로봇트 매니플레이터 각 관절의 토크 제한 범위를 만족시키는 추적동작이 이루어져야한다. n 관절 로봇트 매니플레이터의 토크 벡터를 $\tau(t)$ 라 하면 다음의 식은 토크 제한 범위를 의미한다.

$$\tau_{i, \min}(t) \leq \tau_i(t) \leq \tau_{i, \max}(t) \quad i=1 \dots n \quad (5)$$

단,

$$\tau(t) = [\tau_1(t) \dots \tau_n(t)]^T.$$

2.2 최적 추적 문제로의 변환

앞 절에서 정의된 컨베이어 추적문제를 풀기위하여 로봇트의 전체 동적방정식이 고려되어야한다. n 자유도를 갖는 로봇트 매니플레이터의 동적 특성을 나타내는 L-E 방정식은 다음의 식과 같다.

$$\tau(t) = M(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) \quad (6)$$

단,

$M(q) : R^n \rightarrow R^{n \times n}$ 의 관성 행렬.

$h(q, \dot{q}) : R^n \times R^n \rightarrow R^n$ 의 코리올리스의 힘 및 원심력, 중력 벡터.

한편, 직선 운동을 하는 로봇트 핸드의 변위벡터는 다음과 같이 파라메타 함수 $r(t)$ 를 사용하여 표현 할 수 있다. 즉,

$$x_b(t) = x_b(t_0) + r(t) b \quad (7)$$

단, b 는 컨베이어 벨트의 운동 방향 벡터.

여유자유도를 갖지 않는 로봇트의 경우 역기구학 방정식에 하여 로봇트 핸드의 변위는 관절변위로 변환될 수 있다. 오리엔테이션이 고정되어 있으므로 관절변위는 핸드의 변위를 결정하는 파라메타의 함수이다. 즉,

$$q = f(r) \quad (8)$$

파라메타 함수에 의하여 관절속도와 관절가속도 또한 치환될 수 있으며, 식(6)의 동적방정식도 다음과 같이 변환된다.

$$\tau = M(r)(df(r)/dr) \dot{r} + M(r)(d^2f(r)/dr^2) \dot{r}^2 + h(r, \dot{r}) \quad (9)$$

이 때 로봇트 핸드의 운동상태를 나타내는 상태변수 $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$x_1(t) = r(t), \quad x_2(t) = \dot{r}(t) \quad (10)$$

식(9)는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\tau = m(x_1) u + n(x_1) x_2^2 + h(x_1, x_2) \quad (11)$$

단, $u = \dot{r}$

$$m(x_1) = M(r) (df(r)/dr)$$

$$n(x_1) = M(r) (d^2f(r)/dr^2)$$

이는 다시 입력토크를 제어변수로 하는 2 차의 비선형 상태 공간 방정식으로 다음과 같이 변환된다. [2]-[3]

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (12a)$$

$$\dot{x}_2 = a(x_1) x_2^2 + b(x_1, x_2) + \sum_{i=1}^n c_i(x_1) \tau_i \quad (12b)$$

단,

$$a(x_1) = - [m(x_1)^T n(x_1)] / [m(x_1)^T m(x_1)]$$

$$b(x_1, x_2) = - [m(x_1)^T h(x_1, x_2)] / [m(x_1)^T m(x_1)]$$

$$[c_1(x_1) \dots c_n(x_1)] = m(x_1)^T / [m(x_1)^T m(x_1)]$$

위의 비선형 상태공간 방정식은 로봇트 핸드의 운동상태를 상태변수로하고, 각 관절의 토크를 제어변수로하는 로봇트의 동적모델이며, 추적 궤적의 생성을 위한 동작계획단계에서 다루어진다.

동적 시스템의 상태변수가 원하는 궤적을 생성시키도록 제어변수를 결정하는 문제는, 최적 제어 이론에서의 최적 추적 문제의 범주에 속한다. 로봇트 핸드의 목표 궤적은 파트의 궤적이며, 로봇트 핸드의 상태가 파라메타 함수에 의하여 표현되었으므로 파트의 궤적 또한 이에 의하여 표현되어야한다. 파트는 로봇트 핸드의 직선경로 위를 움직이므로 식(7)에 의하여 파라메타함수로 표현될 수 있다. 기호 $[]_i$ 를 벡터의 i 번째 원소로 정의하면, 파트의 운동상태를 나타내는 상태변수 $\tilde{x} = [x_1 \ x_2]^T$ 는 $[b]_i \neq 0$ 인 어떤 i 에 대하여 다음과 같다.

$$\tilde{x}_1(t) = \frac{[v_b t - v_b t_0 + x_p(t_0) - x_h(t_0)]_i}{[b]_i} \quad (13)$$

$$\tilde{x}_2(t) = \frac{[v_b]_i}{[b]_i} \quad (14)$$

로봇트 핸드의 운동 상태 x 가 파트의 운동 상태 \tilde{x} 를 추적하기 위하여 성능 지수 J 를 다음과 같이 설정 한다.

$$J = \int_{t_0}^{\infty} (\tilde{x} - \tilde{x})^T R (\tilde{x} - \tilde{x}) + \tau^T R \tau dt \quad (15)$$

R 는 $n \times n$ 의 가중행렬로서, 총 토크 발생량을 제한한다. 결국 컨베이어의 추적 계획은 토크 제한조건 (식(5))를 만족시키면서 추적 성능 지수 (식(15))를 최소화 하는 동적 방정식 (식(12a)-(12b))의 해 $x(t)$ 를 구하는 문제이다.

2.3 동적 계획법에 의한 동작 계획

2.2 절에서 정의된 추적문제의 해를 구하기 위하여 Pontryagin의 최소 원리 [7]를 적용시킬 수 있다. 그러나 제한 조건이 있는, 추적 성능 지수를 최소화하는 비선형 상태 공간 방정식의 해를 구하는 것은 매우 힘든 일이다. 성능 지수가 최소 시간인 경우에 한하여 비선형 방정식의 해를 구하지 않고도 최적해를 구하는 것이 가능하다. 따라서 최적 제어 이론에서의 수식적 해법이 아닌 수치적 해법, 즉 동적 계획법(Dynamic Programming : DP)의 사용이 불가피하다. DP의 최적성은 최적성의 원리에 의하여 증명되어 있다. [8] Shin[5]과 Singh [6]은 경로가 주어진 최적 궤적 문제에 DP의 사용이 유용함을 보였으며, 본 논문의 접근 방법은 근본적으로 Shin [5]의 방법과 동일하다. DP의 적용을 위하여 동적 방정식과 추적 성능 지수를 이산화하며, x_1 - x_2 의 위상평면 상에서 탐색이 이루어진다. 자세한 알고리즘은 앞서 발표된 논문 [2]-[3]에 상세되었으며 생략한다. 동적 계획 단계에서 얻어진 로봇의 최적궤적을 \tilde{x}^0 , \tilde{t}^0 라 표시하며, 이는 다음 장에서 서술되는 동작 제어 단계에서 정규궤적(nominal trajectory)으로 사용된다.

3. 컨베이어 추적을 위한 동작 제어

오프라인의 동작계획 단계에서는 컨베이어 벨트의 속도가 일정하다는 가정하에 파트를 추적하는 최적궤적이 형성되었다. 그러나 실제 컨베이어 추적이 있어서 컨베이어 벨트의 속도는 예상치와 비교하여 다를 수 있으며, 이송도중 속도가 변할 수 있다. 이러한 경우 파트와 로봇트 핸드의 운동상태의 궤환에 의한 온라인 제어가 필요하며, 이는 로봇트 제어구조의 하위 단계인 동작제어의 기능에 해당된다. 본 장에서는 컨베이어 벨트의 속도가 동작 계획에서의 가정치와 같지않고 작은 변화가 있는 경우, 파트를 추적하기 위한 동작제어 방법을 제시한다.

3.1 로봇트 매니플레이터의 섭동 방정식

컨베이어 벨트의 속도 v_b 가 어떤 순간에 Δv_b 만큼 변화 한다면 파트 상태의 변화량 $\tilde{\delta x}_1$, $\tilde{\delta x}_2$ 는 식(13)-(14)로부터 다음과 같게된다.

$$\tilde{\delta x}_1 = \frac{[\Delta v_b t - \Delta v_b t_0]_i}{[b]_i} \quad (16)$$

$$\tilde{\delta x}_2 = \frac{[\Delta v_b]_i}{[b]_i} \quad (17)$$

이 때 파트의 변이 상태 $\tilde{\delta x} = [\tilde{\delta x}_1 \quad \tilde{\delta x}_2]^T$ 를 정의한다. 파트 궤적의 변이량을 추적하기 위하여 로봇트 핸드의 궤적 또한 정규 궤적 x_1^0, x_2^0, u^0 로부터 각각 $\delta x_1, \delta x_2, \delta u$ 만큼 변이하여야 한다. 컨베이어 벨트의 속도 변이가 작고, 로봇트 핸드의 변이 또한 충분히 작다고 가정하면, 식(11)로부터 토크의 변화량은

$$\delta \tau = \tau(x_1^0 + \delta x_1, x_2^0 + \delta x_2, u^0 + \delta u) - \tau(x_1^0, x_2^0, u^0) \quad (18)$$

이며, 중간값 정리에 의하여 다음과 같은 섭동 방정식(perturbed dynamics)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \delta \tau &\approx \delta x_1 \frac{\partial \tau(x_1^0, x_2^0, u^0)}{\partial x_1} + \delta x_2 \frac{\partial \tau(x_1^0, x_2^0, u^0)}{\partial x_2} \\ &\quad + \delta u \frac{\partial \tau(x_1^0, x_2^0, u^0)}{\partial u} \\ &= \delta x_1 \alpha(x_1^0, x_2^0, u^0) + \delta x_2 \beta(x_1^0, x_2^0) + \delta u \gamma(x_1^0, x_2^0) \quad (19) \end{aligned}$$

단,

$$\begin{aligned} \alpha(x_1^0, x_2^0, u^0) &= \frac{\partial m(x_1^0)}{\partial x_1} u^0 + \frac{\partial n(x_1^0)}{\partial x_1} (x_2^0)^2 + \frac{\partial h(x_1^0, x_2^0)}{\partial x_1} \\ \beta(x_1^0, x_2^0) &= 2 \frac{\partial n(x_1^0)}{\partial x_1} x_2^0 + \frac{\partial h(x_1^0, x_2^0)}{\partial x_2} \\ \gamma(x_1^0) &= m(x_1^0) \end{aligned}$$

위의 식은 파트의 변화를 추적하는 로봇트 핸드 운동 상태의 변화량과 토크의 변화량과의 관계를 나타내는 $n \times 1$ 의 섭동 방정식이다. 이 식의 양변에 $\tau^T(x_1^0)$ 를 곱한 후 정리하면, $\delta \tilde{x} = [\delta x_1 \quad \delta x_2]^T$ 를 상태변수로 하고, $\delta \tau = [\delta \tau_1 \dots \delta \tau_n]^T$ 를 제어 변수로하는 다음의 2차의 상태 공간 방정식이 얻어진다.

$$\dot{\delta x}_1 = \delta x_2 \quad (20a)$$

$$\dot{\delta x}_2 = -(\tau^T \alpha / \tau^T \gamma) \delta x_1 - (\tau^T \beta / \tau^T \gamma) \delta x_2 + (\tau^T / \tau^T \gamma) \delta \tau \quad (20b)$$

이 때 각 항은 정규궤적의 값에 의존하는 시변 계수이다. 따라서 위의 식은 선형 시변 상태공간 방정식이며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\delta x}(t) = A(t) \delta x(t) + B(t) \delta \tau(t) \quad (21)$$

컨베이어 벨트의 속도변화가 매우 작다는 가정하에 나온 위의 동적 방정식은 그 선형성으로 인하여 제어기 설계가 용이하다.

3.2 동작 제어기의 설계

동작 계획 단계에서 생성된 정규궤적으로부터의 변이궤적은 파트 운동 상태의 변이를 추적하여야 하며, 이를 위하여 성능 지수를 다음과 같이 설정한다.

$$J = \int_{t_0}^{\infty} (\delta \tilde{x} - \tilde{\delta x})^T (\delta \tilde{x} - \tilde{\delta x}) + \delta \tau^T R \delta \tau \, dt \quad (22)$$

제어 변수는 토크제한조건에 의하여 그 크기가 제한된다. 즉 각 시간에 있어서 정규토크와 변이토크의 합이 식(5)의 제한 조건을 만족하여야한다.

$$\delta \tau_{\min}(t) \leq \delta \tau(t) \leq \delta \tau_{\max}(t) \quad (23)$$

단,

$$\delta \tau_{\min}(t) = \tau_{\min}(t) - \tau^0(t)$$

$$\delta \tau_{\max}(t) = \tau_{\max}(t) - \tau^0(t)$$

위의 제한조건을 만족하며 성능 지수를 최소화하는 선형제어기를 설계하는 방법은 잘 알려져 있으며, 본 논문에서는 이를 적용하여 파트 운동상태의 변이를 추적하는 제어기를 설계한다. 변이 토크의 제한조건(식(23))을 만족하며, 식(22)의 성능지수를 최소화하는 선형 시변 방정식 식(21)의 최적 제어 변수는 다음과 같이 상태변수와 파트의 변이를 궤환시키는 형태이다. [7]-[8]

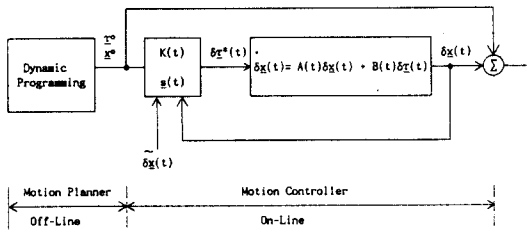


그림 2. 제어구조의 블록선도

$$\varphi(t) = -R^{-1}B(t)K(t)\delta x(t) - R^{-1}B^T(t)s(t) \quad (24)$$

$$\delta x^*(t) = \begin{cases} \delta x_{\min}(t), & \varphi(t) \leq \delta x_{\min}(t) \\ \varphi(t), & \delta x_{\min}(t) < \varphi(t) < \delta x_{\max}(t) \\ \delta x_{\max}(t), & \varphi(t) \geq \delta x_{\max}(t) \end{cases} \quad (25)$$

단, $\dot{K}(t) = -K(t)A(t) - A^T(t)K(t) - I + K(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)K(t)$
 $\dot{s}(t) = -[A^T(t) - K(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)]s(t) + \dot{\delta x}(t)$

매 샘플링 시간마다 섭동 방정식의 계수 $A(t)$, $B(t)$ 가 정규 궤적으로부터 계산되고, $K(t)$ 가 계산되며, 파트 변이의 정보로부터 $s(t)$ 가 얻어진다. 그리고 식(25)의 제어입력이 생성되어 로봇트를 구동시킨다. 결국 컨베이어 추적을 위한 로봇트 매니플레이터의 계층적 제어 구조는 그림 2와 같이 요약된다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 3의 작업 시스템을 모델로하여 시뮬레이션을 수행한다. 로봇트 매니플레이터는 2관절의 SCARA 형으로 각 링크의 길이는 $l_1=l_2=1(m)$ 이며 질량은 $m_1=m_2=1(Kg)$ 으로 가정하였다. 중력은 $-z$ 방향으로 작용하며 질량은 각 링크의 중심에 집중되었다고 가정한다. 상세한 모델의 동적방정식과 섭동방정식은 부록에 수록하였다. 컨베이어 벨트의 방향 벡터 $b = [0.8 \ -0.6]^T$, 속도벡터 $v_b=[0.2 \ -0.15]^T$ (m/sec)로 설정한다. 또한 로봇트 핸드의 초기 위치 $x_h(t_0)=[0.8 \ 1.4]^T$ (m), 파트와 로봇트 핸드의 초기 편차 $d=[0.12 \ 0.09]^T$ (m)를 설정한다. 로봇트의 토크 제한 조건은 다음과 같이 가정한다.

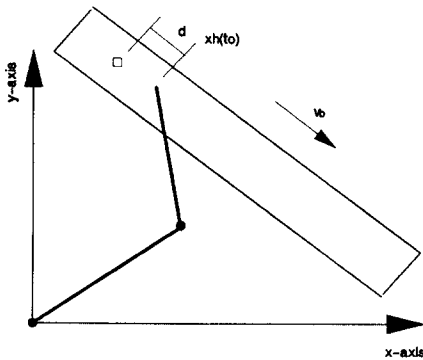


그림 3. 시뮬레이션 모델 : $b=[0.8 \ -0.6]^T$, $v_b=[0.2 \ -0.15]^T$ (m/sec), $x_h(t_0)=[0.8 \ 1.4]^T$ (m), $d=[0.12 \ 0.09]^T$ (m)

$$\begin{aligned} -0.5 \leq \tau_1(t) \leq 0.5 & \quad (N-m) \\ -0.2 \leq \tau_2(t) \leq 0.2 & \quad (N-m) \end{aligned}$$

그림 4는 로봇트 매니플레이터 섭동 방정식의 계수가 시간에 따라 변화하는 모습이다. 즉 식(21)의 섭동 방정식에서

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) \end{bmatrix} \quad B(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{21}(t) & b_{22}(t) \end{bmatrix}$$

인 경우 각 항의 추이를 나타내었다. 이 값들은 전술한 바와 같이 오프라인에서 생성된 정규궤적에 의존한다. 그림 5(a), 그림 5(b)는 로봇트 핸드 가 파트를 추적하는 x 방향의 위치 및 속도 궤적이다. 오프라인의 동작계획 단계에서 발생된 궤적은 안정상태에서의 오차가 없고 정착시간이 1.03(sec)인 매우 양호한 궤적이다. 벨트의 속도가 추적도중 변하는 경우 온라인 제어에 의하여 속도 및 위치 오차를 줄이고 있다. 추적시 발생하는 각 관절의 토크는 그림 6(a)와 그림 6(b)에 나타내었다. 토크 궤적은 안정상태로의 진입시 크게 변화함을 볼 수 있다.

5. 결 론

로봇트 매니플레이터의 실제 응용 작업의 하나인 컨베이어 추적이 있어서, 그 성능 향상을 위한 새로운 제어구조를 제안하였다. 동작 계획 단계에서는 컨베이어 벨트의 속도가 일정하다는 가정하에, 관절 토크의 제한범위를 고려한 추적궤적을 오프라인으로 생성하였다. 그러나 실제 벨트의 속도가 가정치와 적은 편차를 갖게되는 경우, 이의 보상은 동작 제어 단계에서 파트 운동상태의 센서 궤환에 의하여 온라인으로 수행됐다.

제어 구조의 계층적 분리는 로봇트 동적방정식의 높은 비선형성과 결합성에 기인하며, 컨베이어 추적문제에서 벨트 속도의 작은 섭동은 제어 구조의 분리를 타당하게 뒷받침 할 수 있다. 향후 동작 제어 방법의 개선을 위한 분석이 이루어 질 것이다.

* 참고 문헌 *

- [1] W.E.Wilhelm, "Conveyor tracking," in *International Encyclopedia of Robotics: Applications and Automation*, R.C.Dorf, Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988, pp. 283-298.
- [2] 박 태형, 이 범희, 고 명삼, "컨베이어 추적을 위한 로봇트 매니플레이터의 동작 계획," *전기학회 논문지*, vol.38, no.12, 1989, pp.995-1006.
- [3] T.H.Park and B.H.Lee, "An approach to robot motion analysis and planning for conveyor tracking," *Proc. of the 1991 IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, 1991, pp. 70-75.
- [4] K.G.Shin and N.D.Mckay, "Minimum-time control of robotic manipulators with geometric path constraints," *IEEE Trans. Automatic Contr.*, vol. AC-30, no. 6, pp. 531-541, 1985.
- [5] K.G.Shin and N.D.Mckay, "A dynamic programming approach to trajectory planning of robotic manipulators," *IEEE Trans. Automatic Contr.*, vol. AC-31, no.6, pp.491-500, 1986.
- [6] S.Singh and M.C.Leu, "Optimal trajectory generation for manipulators using dynamic programming," *ASME J. Dyn. Sys.*,

Meas., Contr., vol.109, no.2, pp.88-96, 1987

[7] M.Vukobratovic and D.Stokic, *Scientific Fundamentals of Robotics 2 : Control of Manipulation Robots*, Springer-Verlag, 1982.

[8] D.E.Kirk, *Optimal Control Theory*, Prentice-Hall, 1970

* 부 록 *
(2 관절 로봇의 동력학식)

A.1 로봇 핸드의 운동

$$\begin{aligned} \underline{x}_h(t) &= \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \underline{x}_h(t_0) + \dot{x}_1 t \\ &= \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + x_1(t) \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \end{bmatrix} \end{aligned}$$

A.2 동력학식 (Dynamics)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h_{11}(\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2/2) \\ h_{12} \dot{q}_1^2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} m_{11}f_{11} + m_{12}f_{21} \\ m_{21}f_{11} + m_{22}f_{21} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} m_{11}f_{12} + m_{12}f_{12} \\ m_{21}f_{12} + m_{22}f_{22} \end{bmatrix} x_2^2 \\ &\quad - \begin{bmatrix} h_{11}(f_{11}f_{21} + f_{21}^2/2) \\ h_{12}f_{11}^2 \end{bmatrix} x_2^2 \end{aligned}$$

A.3 섭동 방정식(Perturbed Dynamics)

$$\begin{bmatrix} \delta\tau_1 \\ \delta\tau_2 \end{bmatrix} = \delta x_1 \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} + \delta x_2 \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} + \delta u \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}$$

단,

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (\partial m_1 / \partial x_1)u + (\partial n_1 / \partial x_1)x_2^2 + (\partial h_1(x_1, x_2) / \partial x_1) \\ \alpha_2 &= (\partial m_2 / \partial x_1)u + (\partial n_2 / \partial x_1)x_2^2 + (\partial h_2(x_1, x_2) / \partial x_1) \\ \beta_1 &= 2n_1(x_1)x_2 + \partial h_1(x_1, x_2) / \partial x_2 \\ \beta_2 &= 2n_2(x_1)x_2 + \partial h_2(x_1, x_2) / \partial x_2 \\ \gamma_1 &= m_1(x_1) \\ \gamma_2 &= m_2(x_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial m_1 / \partial x_1 &= (\partial m_1 / \partial q_1)(dq_1/dx_1) + (\partial m_1 / \partial q_2)(dq_2/dx_1) \\ \partial m_2 / \partial x_1 &= (\partial m_2 / \partial q_1)(dq_1/dx_1) + (\partial m_2 / \partial q_2)(dq_2/dx_1) \\ \partial n_1 / \partial x_1 &= (\partial n_1 / \partial q_1)(dq_1/dx_1) + (\partial n_1 / \partial q_2)(dq_2/dx_1) \\ \partial n_2 / \partial x_1 &= (\partial n_2 / \partial q_1)(dq_1/dx_1) + (\partial n_2 / \partial q_2)(dq_2/dx_1) \\ \partial h_1 / \partial x_1 &= (\partial h_1 / \partial q_1)(dq_1/dx_1) + (\partial h_1 / \partial q_2)(dq_2/dx_1) \\ \partial h_2 / \partial x_1 &= (\partial h_2 / \partial q_1)(dq_1/dx_1) + (\partial h_2 / \partial q_2)(dq_2/dx_1) \\ \partial h_1(x_1, x_2) / \partial x_2 &= 2x_2h_1 \\ \partial h_2(x_1, x_2) / \partial x_2 &= 2x_2h_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dq_2/dx_1 &= -1/(l_1 l_2 s_2) (b_x x + b_y y) \\ dq_1/dx_1 &= \cos^2(\tan^{-1}(y/x)) (b_x x - b_y y)/x^2 - (dq_2/dx_1) \\ &\quad (l_1 l_2 c_2 + l_2^2) / ((l_1 + l_2 c_2) \cos^2(\tan^{-1}(l_2 s_2 / (l_1 + l_2 c_2))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial m_1 / \partial q_1 &= (df_{11}/dq_1)m_{11} + m_{12}(df_{21}/dq_1) \\ \partial m_1 / \partial q_2 &= (dm_{11}/dq_2)f_{11} + m_{12}(df_{11}/dq_2) + (dm_{12}/dq_2)f_{21} \\ &\quad + m_{12}(df_{21}/dq_2) \\ &= -m_2 l_1 l_2 s_2 f_{11} + m_{12}(df_{11}/dq_2) - m_2 l_1 l_2 s_2 f_{21}/2 \\ &\quad + m_{12}(df_{21}/dq_2) \\ \partial m_2 / \partial q_1 &= (df_{11}/dq_1)m_{21} + m_{22}(df_{21}/dq_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial m_2 / \partial q_2 &= (dm_{21}/dq_2)f_{11} + m_{21}(df_{11}/dq_2) + m_{22}(df_{21}/dq_2) \\ \partial n_1 / \partial q_1 &= (df_{12}/dq_1)m_{11} + m_{12}(df_{22}/dq_1) \\ \partial n_1 / \partial q_2 &= (dm_{11}/dq_2)f_{12} + m_{11}(df_{12}/dq_2) + (dm_{12}/dq_2)f_{12} \\ &\quad + m_{12}(df_{22}/dq_2) \\ &= -m_2 l_1 l_2 s_2 f_{12} + m_{11}(df_{12}/dq_2) - m_2 l_1 l_2 s_2 f_{22}/2 + \\ &\quad m_{12}(df_{22}/dq_2) \\ \partial n_2 / \partial q_1 &= (df_{12}/dq_1)m_{21} + m_{22}(df_{22}/dq_1) \\ \partial n_2 / \partial q_2 &= m_{21}(df_{12}/dq_2) + m_{22}(df_{22}/dq_2) \\ \partial h_1 / \partial q_1 &= (dh_{11}/dq_1)(f_{11}f_{21} + 1/2f_{21}^2) + h_{11}((df_{11}/dq_1) \\ &\quad f_{21} + f_{11}(df_{21}/dq_1) + f_{21}(df_{21}/dq_1)) \\ \partial h_1 / \partial q_2 &= (dh_{11}/dq_2)(f_{11}f_{21} + 1/2f_{21}^2) + h_{11}((df_{11}/dq_2) \\ &\quad f_{21} + f_{11}(df_{21}/dq_2) + f_{21}(df_{21}/dq_2)) \\ \partial h_2 / \partial q_1 &= (dh_{12}/dq_1)f_{11}^2 + 2h_{12}f_{11}(df_{11}/dq_1) \\ \partial h_2 / \partial q_2 &= (dh_{12}/dq_2)f_{11}^2 + 2h_{12}f_{11}(df_{11}/dq_2) \end{aligned}$$

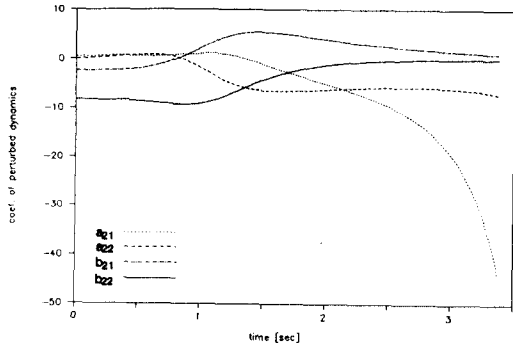
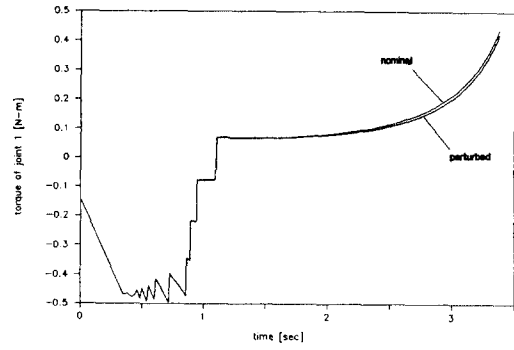
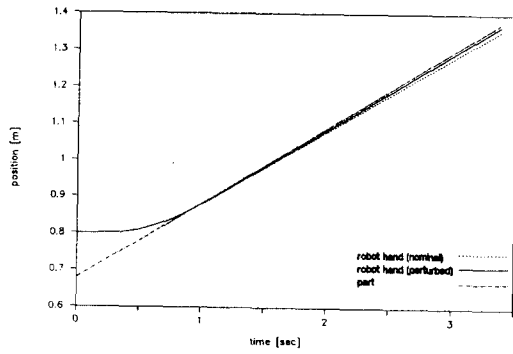


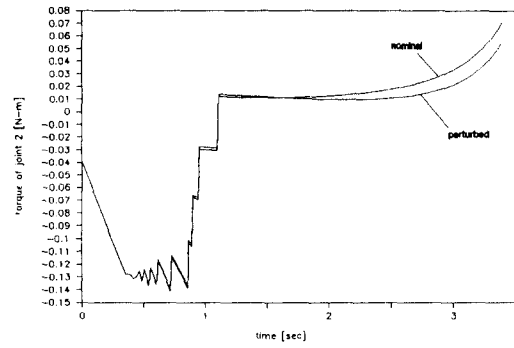
그림 4. 섭동 방정식의 계수 변화



(a)



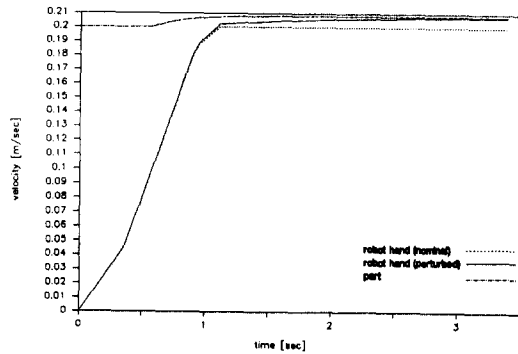
(a)



(b)

그림 6. 컨베이어 추적시 로봇트 관절 토크의 궤적

(a) 1 관절의 토크 (b) 2 관절의 토크



(b)

그림 5. 컨베이어 추적시 로봇트 핸드(x축성분)의 궤적

(a) 위치 궤적 (b) 속도 궤적