

여유자유도를 갖는 로봇트 머니플레이터의 충돌회피

이재만 최영규 황창선

부산대학교 공과대학 전기공학과

A Collision Avoidance Scheme for Redundant Robot Manipulators

Jae-Man Lee Young -Kiu Choi Chang-Sun Hwang

Department of Electrical Engineering Pusan National University

Abstract

This paper presents a collision avoidance scheme for redundant robot manipulators based on the Configuration Control Scheme. We set a center line through the free space. And we use the redundancy to put the robot links around the center line as close as possible to avoid the collision with obstacles. Computer simulation shows the effectiveness of this approach.

1. 서론

산업용 로봇트가 여러 종류의 생산라인에 투입되어 사용되어짐에 따라, 산업용 로봇트의 성능에 대한 다양성(versatility)과 기민성(dexterity)이 더욱 요구되는 추세이며, 이러한 요구를 수용하기 위해서 로봇트 머니플레이터(robot manipulator)가 현재보다 더 많은 자유도를 갖을 필요성이 있다. 로봇트 머니플레이터가 지정된 작업을 수행하기 위해서 필요한 자유도보다 많은 자유도를 갖을 때에, 여유자유도(redundancy)를 갖는다고 한다.

현재 대부분의 로봇트 머니플레이터는 5개 내지 6개의 최소한의 자유도만을 갖고 있어서 여유자유도가 없는 상태이므로, 특이점회피(singularity point avoidance)와 방해물회피(obstacle avoidance) 및 관절의 위치, 속도 한계회피(joint position and velocity limit avoidance) 등을 용이하게 할 수 없으나, 여유자유도를 추가하게 되면 이러한 문제들을 비교적 쉽게 해결할 수 있고 따라서 로봇트 머니플레이터를 효과적으로 사용할 수 있어서 생산성향상과 제품의 질을 높이는 데에 이바지할 수 있다.

이러한 여유자유도를 갖는 머니플레이터는, 여유자유도로 말미암아 특정한 작업을 수행할 때에 무한히 많은 팔의 형상을 갖으므로 앞에서 언급한 바와 같이 성능상의 여러가지 잇점을 취할 수 있으나, 제어문제가 매우 복잡하므로 이에 대한 연구가 비교적 최근에 와서야 활성화되고 있다.[1-8]

이러한 방식들은 직접적으로나 간접적으로 Jacobian행렬의 가산역행렬을 사용하여 속도 차원에서 여유자유도를 사용하였으나, 비주기적 운동(non-cyclic motion)이라는 문제가 발생하였고 또한 여유자유도를 이용한 부수작업(additional task)수행이 지역적 최적화(local optimization)에 빠져 그 의미를 잃게 되는 경우가 많다.

최근에 여유자유도를 갖는 로봇트 머니플레이터의 제어문제에 형태제어(configuration control)[9] 라는 새로운 방식이 도입되었다. 이 방식에서는 수행하고자 하는 부수작업을 여유자유도 갯수만큼의 기구학함수(kinematic function)들로 표현하여 이러한 기구학함수들이 지정된 함수값들을 갖도록 위치차원에서 직접적으로 제어하여 부수작업을 수행하므로 주기적운동을 실현할 수 있다. 최적화문제도 형태제어형식으로 취급될 수 있으며 초기형태가 최적형태로 시작하면 전운동 구간에

서 최적형태를 유지할 수 있다. 이러한 형태제어를 이용하여, 여유자유도를 갖는 머니플레이터의 충돌회피에 대한 연구[10]가 발표된 바 있으나, 충돌회피에 관련된 부등식제한조건식 처리에 있어서 불연속오차 등의 문제점이 지적될 수 있다.

본문에서는 형태제어를 이용한 충돌회피에 대한 간접 방법을 취급한다. 방해물들간의 공간의 중심부분에 기준선을 설정해 놓고 머니플레이터 링크들이 이 기준선에 최대한 근접하도록 여유자유도를 이용하여 충돌회피를 하도록 한다.

2. 형태제어

형태제어방식[9]에서 여유자유도를 이용하여 부수작업(additional task)을 수행하기 위해서, 작업공간 또는 관절공간에서 기구학함수(kinematic function)를 정의해야 한다.

이러한 기구학함수 $\Phi(\theta) = \{ \phi_1(\theta), \phi_2(\theta), \dots, \phi_r(\theta) \}$ 를 작업자가 선택하며, $\phi_i(\theta)$ 는 머니플레이터의 형태에 대한 임의의 함수가 된다. 머니플레이터의 자유도수를 n 이라 하고, 지정된 작업을 하기 위한 필요자유도수를 m 이라고 할 때에, 여유자유도수 r 은 $n-m$ 이 된다.

여유자유도의 이용목적은 작업제한조건(task constraint)으로 표현하면,

$$\Phi_d(t) = \Phi(\theta) \quad (1)$$

단, $\Phi_d(t)$ 는 작업자가 선택한 기구학함수 $\Phi(\theta)$ 의 목표 시간함수를 뜻하며, 여유자유도를 이용한 여분의 작업사항을 나타낸다.

단말효과기의 작업공간에서의 m 차원좌표 $Y(\theta)$ 와 r 차원의 기구학함수 $\Phi(\theta)$ 를 합쳐서 n 차원의 형태벡터 $X(\theta)$ 를 다음과 같이 만들 수 있다.

$$X(\theta) = (Y(\theta)^T \Phi(\theta)^T)^T \quad (2)$$

형태벡터 $(X_1(\theta) \dots X_n(\theta))$ 는 n 개의 작업관계 일반좌표로 나타나며, 식(2)의 머니플레이터 기구학적 표현식은 더 이상 여유자유도를 갖지 않는다. 즉 합쳐진 작업공간의 차원과 관절공간의 차원은 각각 n 이다. 그래서 머니플레이터는 n 차원의 작업공간에서 동작하는 여유자유도가 없는 머니플레이터로 간주되어, 특이형태(singular configuration)가 나타나지 않는다고 할 때에 주기성(cyclic)을 갖게되며 따라서 단말기효과기의 작업공간에서의 폐곡선운동이 관절공간에서의 폐곡선운동으로 매핑(mapping)된다.

기구학함수 $\Phi(\theta)$ 와 지정된 궤적 $\Phi_d(t)$ 는 작업자가 선택하므로, 형태제어방식은 특별한 경우의 응용에 국한되지 않고 여유자유도를 갖는 로봇트 머니플레이터의 제어에 대한 일반적인 틀을 제공한다. 최적화문제도 형태제어의 한 접근방식으로 처리될 수 있다[9]. 여유자유도를 이용하여 최적화하고자 하는 스칼라 기구학목적함수(scalar kinematic objective function)을 $L(\theta)$ 라고 표시하자. 이때의 여유자유도를 갖는 로봇트 머니플레이터의 제어문제는 $Y=f(\theta)$ 라는 단말효과기 제한

조건하에서 $L(\theta)$ 를 최적화하는 관절 각 θ 를 찾는 것이다. 이와 같은 제한된 최적화문제에 Lagrange multiplier를 도입하여 풀면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다[9].

$$N_o(\partial L/\partial \theta) = 0 \quad (3)$$

단, N_o 는 $n \times n$ full-rank 행렬로 $N_o \cdot J_o^T = 0$ 를 만족하며, J_o 는 $n \times n$ 행렬로 θ 에 대한 단말효과기(end-effector)의 Jacobian 행렬을 나타낸다.

$L(\theta)$ 의 최적화를 위해서, $L(\theta)$ 의 θ 에 대한 미분벡터가 단말효과기의 Jacobian J_o 행렬의 영공간(null space)에 대한 투영(projection)이 0으로 되어야 함을 식(3)에서 알 수 있다. 기구학함수 $\Phi(\theta) = N_o(\partial L/\partial \theta)$ 로 놓고 $\Phi_d(t) = 0$ 으로 놓음으로써, 최적화문제를 형태제어의 틀에서 여분의 작업수행문제로 취급할 수 있다.

3. 충돌회피방법

그림1. 과 같이 방해물간의 공간의 중심부분에 점선과 같은 기준선을 설정한 뒤에 매니플레이터의 관절과 기준선간의 거리를 관절각의 함수로 표시할 수 있으며 각 관절에서 계산된 거리의 제곱의 합을 최소화하고자 하는 목적함수로 놓을 수 있다.

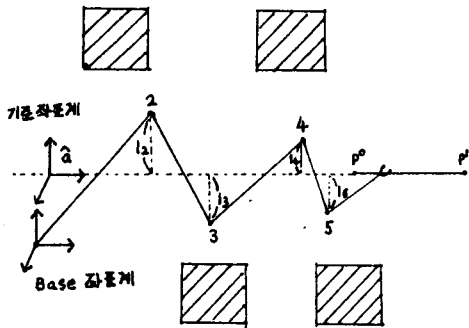


그림 1. 방해물과 기준선

이 목적함수를 앞 절의 형태제어의 형식으로 최소화시킴으로써, 매니플레이터와 방해물간의 충돌을 피할 수 있다. 그림1에서 매니플레이터에 지정된 작업은 단말효과기가 P_0 점에서 P_1 점으로 직선운동하는 것이라고 하자. 기준좌표계의 원점으로부터 1번째 관절까지의 위치벡터를 P_1 라고 하면 P_1 는 관절각 벡터 θ 의 함수로 표시할 수 있다. 기준선의 방향을 나타내는 단위벡터를 \hat{a} 라고 하면, 1번째 관절에서 기준선까지의 직선거리 l_1 의 관계식은 다음과 같다.

$$l_1^2 = \|P_1\|^2 - P_1 \cdot \hat{a} \quad (4)$$

베이스(base)에 고정된 첫번째 관절을 제외한 나머지 관절에서의 l_i^2 를 전부 합한 것을 목적함수 L 이라고 하자.

$$L = \sum l_i^2(\theta) \quad (5)$$

위의 L 을 θ 에 대해서 최소화하는 조건은 앞의 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 즉

$$\begin{aligned} \Phi(\theta) &= N_o(\theta)(\partial L/\partial \theta) \\ \Phi_d(t) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에서 $J_c = \partial \Phi/\partial \theta$ 로 정의하면 다음 식이 성립한다.

$$\begin{pmatrix} Y \\ \Phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_o \\ J_c \end{pmatrix} \dot{\theta} \quad (7)$$

식(2)의 기호법을 이용해서 식(7)을 다시 써 보면

$$\dot{x} = J \dot{\theta} \quad (8)$$

단, $J = (J_o \ J_c)^T$ 로서 square matrix 임.

$X_d(t)$ 와 초기 $\theta_d(0)$ 가 주어지면 식(8)을 이용하여 $\theta_d(t)$ 를 다음과 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$\Delta \theta \approx J^{-1} \Delta X \quad (9)$$

식(9)을 통하여 구한 $\theta_d(t)$ 를 위치제어기의 명령으로 입력시킨다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 연구에서는 그림2와 같이 각 링크의 길이가 1인 3 자유도 평면 매니플레이터에 대해서 시뮬레이션하였다. 관절각은 그림과 같이 절댓각도를 취하였다.

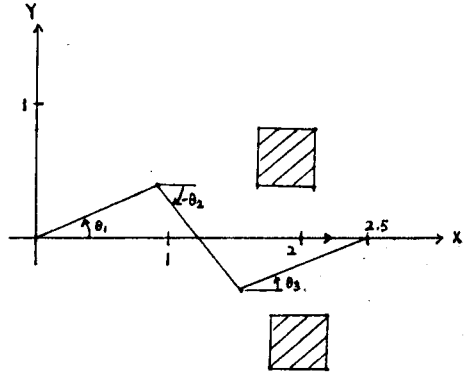


그림 2. 3 자유도 평면 매니플레이터

기준선은 $y=0$ 으로 선택하였고 단말효과기 (2,0)에서 (2.5,0)로 운동할 때의 관절궤적을 그림3과 같이 구하였다.

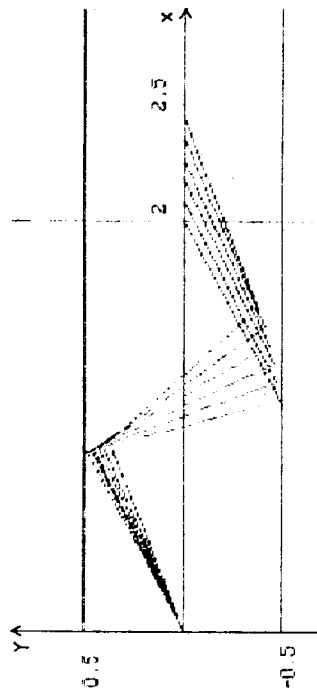


그림 3. 형태궤적

5. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 여유자유도를 갖는 로보트머니플래이터의 충돌회피를 형태제어의 형식으로 취급하였다. 머니플래이터의 링크들이 주어진 기준선에 가장 근접하게끔 여유자유도를 사용하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 충돌회피를 확인할 수 있었다. 만일 시뮬레이션상에서 방해물과 충돌이 발생한다면 충돌지점과 반대방향으로 기준선을 옮겨 줌으로써 충돌을 회피할 수 있다. 앞으로는 이러한 기준선을 단순한 직선에서 연결된 직선 또는 일반적인 곡선으로 확장해서 원활한 충돌회피작업을 수행시키고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] D.E.Whitney, "Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses", IEEE Trans. Man-Machine Syst. Vol. MMS-10 no.2, pp. 47-53, 1969.
- [2] A Liégeois, "Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms", IEEE Trans. System, Man Cybern., vol. SMC-7, no. 12, pp. 868-871, 1977.
- [3] T.Yoshikawa, "Manipulability and redundancy control of robotic mechanisms", in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (St.Louis, Mo, Mar. 1985) pp. 1004-1009.
- [4] C.A Klein and C.H Huang, "Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators", IEEE Trans. System, Man Cybern., vol. SMC-13, no. 3, pp.245-250, 1983.
- [5] A. A. Maciejewski and C.A.Klein, "Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments", Int. J. Robotics Res., vol. 4, no. 3, pp. 109-117, 1985.
- [6] C.A.Klein and A.I.Chirco, "Dynamic simulation of a kinematically redundant manipulator system", J. Robotic Syst., vol. 4, no. 1, pp. 5-23, 1987.
- [7] J.M.Hollerbach and K.C.Suh, "Redundancy resolution of manipulators through torque optimization", in Proc IEEE Int. Conf.on Robotics and Automation(St. Louis, Mo, Mar. 1985), pp. 1016-1021.
- [8] P.Hsu, J.Hauser, and S.Sastry, "Dynamic control of redundant manipulators", in Proc. IEEE Int. Conf on Robotics and Automation (Philadelphia, PA, Apr. 1988), pp. 183-187.
- [9] H. Seraji, "Configuration control of redundant manipulators : the theory and implementation", IEEE Trans. Robotics Automat., vol. 5, no. 4, pp. 472-490, 1989.
- [10] R.Colbaugh, H Seraji, and K.L.Glass, "Obstacle avoidance for redundant robots using configuration control", Journal of Robotic Systems, vol. 6, no 6, pp. 721-744, 1989.