한국공작기계학회 2000년도 추계학술대회 논문집 pp.113~118

뉴럴 네트워크를 이용한 Dual-Arm 로봇의 충돌회피 최적작업계획

Optimal Collision-Avoidance Task Planning for Dual-Arm Using Neural Network

최우형*, 정동연*, 배길호**, 김인수***, 한성현****

* 경남대학교 대학원

** (주)LG전자

*** 부산대학교 기계공학과

**** 경남대학교 기계자동화공학부

Abstract

Collision free task planning for dual-arm robot which perform many subtasks in a common work space can be achieved in two steps : path planning and trajectory planning. Path planning finds the order of tasks for each robot to minimize path lengths as well as to avoid collision with static obstacles. A trajectory planning strategy is to let each robot move along its path as fast as possible and delay one robot at its initial position or reduce speed at the middle of its path to avoid collision with the other robot.

1. 서 론

여러 개의 소작업으로 이루어진 작업 공간에서 로봇이 빠른 시간에 작업을 완료하는 것은 생산성 향상에 큰 도움이 된다. 이 때, 단독 로봇보다는 다중 로봇으로 작업을 분담하여 수행할 경우 작업 시간을 크게 단축할 수가 있다. 그러나 같은 작업 공간에서 두 대 이상의 로봇이 작업을 수행할 경우, 각 로봇의 경로 설정이나 궤적 계획을 할 때 단독 로봇에서는 발생하지 않는 충돌을 고려해야하는 어려움이 있다. 최근까지 이러한 다중 로봇의 최소시간동작 계획은 다음 두 단계로 즉, 공정 장애물을 피하는 기하학적 경로 설정 방법과 충돌 회피 최소시간 궤적 계획방법을 들 수 있다.

본 논문에서는 단일 구간이 아닌 작업 공간에서 이중암 로봇이 여러 소작업을 수행할 때, 로봇암 상호간의 충돌 회피를 고려해 전체 작업을 가장 빠른 시간에 마치는 최소시간 충돌회피 궤적계획 알고리즘을 제시한다.

첫 번째 단계에서는 작업 수행 순위가 결정되어 있지 않은 작업 공간에서 로봇암 각각의 이동경로를 최소로 하는 최단거리 경로 (작업 순서)를 설정한다. 이를 위해, 신경회로망을 이용해 MTSP(multiple travelling salesman problem)문제를 해결하여 최소 이동경로를 설정한다.

두 번째 단계에서는 설정된 경로(작업 순서)에 대해 두 로봇 상호간의 충돌 회피를 고려한 최소시간 궤적계획을 한다. 이를 위해 먼저 Bobrow 와 Shin[2] 등이 제안한 알고리즘으로 최적 속도계획을 한다. 그리고, 최소시간 측면에서 시간 지연법과 속도 조절법이 충돌회피 및 최소시간을 만족한다는 것을 보인 후, 그 결과를 이용하여 시간 지연법 및 속도 조절법을 혼합(hybrid)적용하여 최소시간 충돌회피 궤적 계획을 한다.

2. 경로 설정과 최적 속도 계획

2.1 최단거리 경로 설정

이중암 로봇의 전체 작업시간을 최소로 하는 작업순서를 결정할 때 목적함수를 시간변수로 구성해야 하지만, 계산상의 어려움을 피하기 위해 목적함수를 거리변수로 구성하여 이동 거리를 최소로 하는 작업순서를 설정한 후 이 이동거리에 대해 최적 속도계획을 한다. 이 때, 로봇의 동특성으로 인해 최단거리가 최소시간을 만족하는 것은 아니나 전체 이동거리를 최소로 하여 최적 속도 계획을 하면 계산량을 줄일 수 있고, 또한 전체 작업 시간 측면에서도 최소 시간을 얻을 수 있다.

이동거리를 최소화하는 문제는 전형적인 MTSP라 볼 수 있다. 이 MTSP를 해결하기 위해 앞서 다음과 같은 가정을 한다.

1) 각 소작업의 수행 시간은 같다.
2) 임의의 두 소작업 사이에서의 주행 경로는 직선이다.
3) 전체 소작업을 수행한 후 로봇암은 원위치로 복귀한다.

2.2 최적 속도 계획

신경회로망의 결과로 얻은 경로(작업순서)에 따라 이동하는 로봇의 동작 시간을 최소로 하기 위해서, 관절벡터로 구성된 로봇의 동적방정식을 하나의 스칼라 변수인 경로 함수로 변환하고, 토크 제한조건을 가속도 제한조건으로 변환하여, 경로와 속도로 이루어진 위상평면(phase plane)에서 로봇의 최적 속도 계획을 하는 방법을 적용한다.[2]

위상 평면상의 최적 속도곡선은 최대 가속과 감속을 반복하는 특성을 갖으며, 이 최적 속도는 경로상의 지점에서 취하는 최대 속도가 된다. 경로 상의 임의의 위치에서 가속도 제한조건을 만족하면서 새로운 가속곡선 V_{new}을 구성할 때, 최적 속도곡선과 가속곡선 V_{new} 사이에는 다음의 정리 1이 성립한다.

[정리 1] 경로 $[0, s_f]$에서 최적 속도 곡선을 V_{opt}라 하고, V_{opt}중에서 가속곡선의 집합을 V_{acc}라 한다. 그리고 최대 속도 경계내의 영역에서 $s = s_0$인 지점에서 새로운 가속곡선 V_{new}를 구성하자. 단, $V_{new}(s_0) < V_{opt}(s_0)$ 이다. 그러면, 구간 $[s_0, s_f]$내에서 가속곡선 V_{new}와 V_{acc}에 대해서 $V_{new} < V_{acc}$가 성립한다. 즉 새로운 가속곡선 V_{new}은 최적 속도곡선 V_{opt}중에서 가속 곡선과 만나지 않고 반드시 감속곡선과 만나서 새로운 변환점(switching point)를 형성한다.

3. 최소 시간 충돌 회피 궤적 계획

3.1 충돌 회피 궤적 계획

3.1.1 경로-시간(s×t)공간과 지연 시간

이중암 로봇의 충돌회피는 경로뿐만 아니라 로봇의 궤적 정보와도 관련이 있다. 이중암 로봇의 경로를 변경할 수 없을 때, 한 예로, 로봇암 r_1이 원래의 궤적에 따라 이동한다면, 충돌을 피하기 위해서 다른 로봇암 r_2는 원래의 궤적을 적절히 변경하여 이동해야 한다. 로봇의 궤적 계획을 공간-시간으로 구성된 4차원에서 한다는 것은 매우 힘든 일인데, 로봇의 위치와 시간정보를 2차원 공간인 경로-시간 공간(path-time space, s×t space)상으로 줄여 표현하면 쉽게 궤적 계획을 할 수 있다. s×t 공간에서 로봇의 궤적은 경로 π로 나타나며, 로봇의 궤적계획을 한다는 것은 s×t 공간에서 경로 π를 변경하는 정적(static)경로 계획을 뜻한다. 이중암 로봇의 궤적이 겹치는 잠재적 충돌공간은 s×t 공간에서 2차원 다각형의 충돌 영역으로 나타난다.

이중암 로봇의 충돌을 피하기 위해서는 s×t 공간에서 로봇암 r_2의 경로 π가 충돌 영역을 통과하지 않도록 경로를 변경하면 되는데, 이 때 충돌 회피뿐만 아니라 최소시간 또한 만족하려면 경로 π가 충돌영역과 접하도록 경로 계획을 하면 된다. s×t 공간에서 로봇암 r_2의 경로 π의 기울기는 로봇암 r_2의 속도 $\dot{s}$가 되며, 이 속도 $\dot{s}$는 위상평면 기법으로 구한 최적 속도가 된다. 경로 π의 기울기가 그 지점에의 최적 속도가 된가는 사실을 이용하여 이중암 로봇의 충돌을 피하기 위해서 로봇암 r_2의 최소 지연 시간을 다음과 같이 구할 수 있다.

경로 s 를 공통 축으로 위상평면 $(s-\dot{s})$와 경로-시간공간(s×t)을 결합하면 $\dot{s}-s-t$ 평면을 얻는다. s×t 공간에서 충돌영역의 시작시간을 t_1, 충돌 영역의 끝시간을 t_u라 놓는다. 단, $t_1 < t_u$이다. 그리고 충돌영역이 경로 π와 접하는 지점을 $[t_{tp}, s_{tp}]$라 놓는다. $t \in [t_1, t_u]$ 구간에서 충돌영역의 하단경계선을 따라 시간 t를 증가시키면서 하단 경계선의 기울기 μ와 이 지점에서의 최적 속도 $\dot{s}(=ds/dt)$의 크기를 비교한다. $ds/dt = \mu$ 가 되는 지점 $[t_{tp}, s_{tp}]$를 접점(tangent point)로 놓는다. 만약 접점이 여러 개 생기면 마지막 접점을 선택한다. 원래의 경로 π에 대해 $s = s_{tp}$일 때의 시간이 t_0라면, 충돌을 피하기 위한 경로 π의 최소 지연시간은 $s = s_{tp}$에서 t_{tp} 와 t_0의 차이가 된다. 곧, 최소지연시간은 $\Delta t = t_{tp} - t_0$이다.

이상과 같이 로봇의 궤적 계획을 하는데 있어서 충돌회피와 최소시간을 이루어야 하는데, s×t 공간상에서 원래의 경로 π를 변경하여 충돌을 피하는 새로운 경로 π_c를 구성할 때, 경로 π_c가 충돌회피와 함께 최소시간을 만족하는 조건을 다음의 세 가지로 정리할 수 있다.

조건1 : 경로 π_c는 충돌영역을 통과해서는 안 된다.

곧, $s = s_{tp}$일 때 경로 π_c의 최소시간은 t_{tp}가 된다.

조건2 : 나머지 구간 $[s_{tp}, s_f]$에서 경로 π는 최대속도를 갖는다. 속도 $\dot{s}$는 s×t 공간에서 경로 π_c의 기울기를 나타낸다.

조건3 : $t=t_{tp}, s=s_{tp}$ 에서 경로 π_c의 순간속도 $\dot{s}=ds/dt \mid_{t=t_{tp}}$는 최대 값을 갖는다.

위의 세 조건을 만족하는 어떤 경로 π_c라도 충돌을 피하면서 s_f에 최소시간에 도달할 수 있음을 알 수 있다. 충돌을 피하기 위한 로봇암 r_2의 궤적 계획 방법으로는 출발시간을 지연하는 법과 이동 중에 속도를 줄이는 방법이 있다. 다음 장에서는 이 두 가지 방법이 위의 세 조건(충돌회피와 최소시간)을 만족하는가에 대해 여러 경우로 나누어 고찰한다. 로봇의 최적속도와 변경된 속도는 위상평면 기법에 의해 구한다.

3.1.2 시간 지연법

로봇의 속도 곡선은 변경하지 않고 최소 지연시간 $\Delta t=t_{tp}-t_0$ 만큼 로봇암 r_2의 출발 시간을 지연시키면 s×t 공간에서 로봇암 r_2의 수정된 경로 π_d가 $[t_{tp}, s_{tp}]$를 지나게 되어 충돌을 피할 수 있다. 그림 1에서 출발 시간을 지연시킨다는 것은 s×t 공간에서 경로 π를 시간축의 양(+)방향으로 이동시키는 것과 같다. 시간 지연법에 의한 이중암 로봇의 충돌 회피는 정리 2에 의해 최소시간을 보장한다.

[정리 2] 로봇암 r_2의 속도 곡선은 변경하지 않고, 출발시간을 지연하는 충돌 회피 궤적은 충돌 회피와 함께 최소시간을 보장한다.

[증 명] 최적 속도 곡선을 V_{opt}라하고 이 속도에 따라 구한 s×t 공간상의 최적경로를 π_0한다. 그리고, Δt 만큼 시간 지연된 속도 곡선을 V_{delay}, 지연된 경로를 π_d라 한다. Δt만큼 지연된 경로 π_d는 접점 $[t_{tp}, s_{tp}]$를 지나게 된다. 최적경로 π_0에 대해 $s=s_{tp}$일 때 속도는 $\dot{s}_{tp}$이고 나머지 거리 $[s_{tp}, s_f]$ 동안 걸린 시간은 $t_r=\int_{s_{tp}}^{s_f}\frac{1}{V_{opt}}ds$ 가 된다. π_d에 대해 $[s_{tp}, s_f]$동안 걸린 시간은 $t_r=\int_{s_{tp}}^{s_f}\frac{1}{V_{delay}}ds$ 가 된다. 속도 곡선은 변경하지 않고 시간지연만 시켰으므로, 구간 $[0, s_f]$에서 $V_{opt}\equiv V_{delay}$가 성립한다. 따라서 $t_r'=t_r$가 된다. 새로운 경로 π_d는 $s=s_{tp}$에서 $t=t_{tp}$ 이고, $ds/dt=\dot{s}_{tp}$ 이고, $V_{opt}\equiv V_{delay}$이므로 조건1과 조건3을 만족한다. 그리고, 구간 $[s_{tp}, s_f]$에서 경로 π_0와 π_d의 속도에 대해서 $V_{opt}\equiv V_{delay}$ 이므로 조건2를 만족한다. 따라서 시간지연에 의해 구한 새로운 경로 π_d는 최소시간 충돌회피 경로이다. 새로운 경로 π_d에 대한 최소시간은 $t_f^{delay}=t_{tp}+t_r'$ $=t_0+\Delta t+t_r=t_f+\Delta t$ 가 된다.

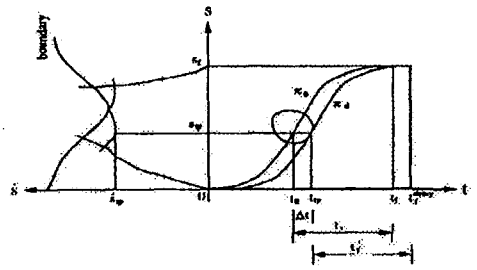

그림 1. 시간지연에 의한 궤적 계획

3.1.3 속도 조절법

시간 지연법에서와 마찬가지로 이동 속도를 조절하여 충돌을 피하려면, s×t 공간에서 수정된 경로 π_s가 $[t_{tp}, s_{tp}]$를 지나도록 하면 된다. 즉, $[0, s_{tp}]$에서 속도를 줄였다가 다시 가속을 하면 된다. 그러나, 속도를 변경하여 s×t 공간에서 $[t_{tp}, s_{tp}]$을 지나도록 한다는 것은 매우 힘든 일이다. 다시 말하면, Δt만큼 지연된 새로운 속도 곡선을 얻기 위해 속도를 줄이는 위치와 양을 결정하는 것은 어려운 일이다. 이러한 어려움 때문에, 그 동안 속도 조절방법이 큰 관심을 끌지 못했었다. 속도 조절방법에서 속도를 줄이는 위치와 크기에 제한이 없으면, 위상평면에서 반복적인 방법으로 지연된 속도 곡선을 얻을 수 있다.

[알고리즘 1 : 속도 조절법]

[단계 1] $s=s_1(\ >0)$, $ds/dt=\dot{s}_1$에서 $s=0$방향으로 감속곡선을 거꾸로 구성한다. 가속곡선과 만나는 지점을 s_0라 한다.

[단계 2] $s=s_f$에서 가속곡선을 구성한다. 보조정리1에 의해 가속곡선은 감속곡선과 만난다. 이 지점을 s_2라 한다.

[단계 3] $s\geq s_2$에서는 원래의 속도곡선 V_{opt}를 따른다. 새로운 속도곡선을 V_{speed}라 놓는다.

[단계 4] 속도곡선 V_{speed}에 대해 $\int_0^{s_{tp}} \frac{1}{V_{speed}} ds < t_{tp}$이면, s_1을 증가시키고 단계 1로, 아니면, 단계 5로.

[단계 5] 이 때의 s_0, s_1, s_2를 새로운 변환점(switching point)으로 놓는다. 과정을 끝낸다.

지연된 속도곡선과 위상 평면상의 최적 속도곡선의 특성을 이용하면 속도 조절에 의한 궤적계획은 다음의 정리 3,4 에 의해 충돌 회피와 아울러 최소 시간을 보장한다. 로봇암 r_2의 최적 속도곡선의 최초 변환점을 s_a라 놓는다.

[정리 3] 접점 s_{tp}가 초기 가속 곡선상에서 형성되는 경우, 곧 $s_{tp} \in (0, s_a)$일 때, 이동 속도 조절법은 최소 시간을 만족하지 않는다.

[증 명] 새로운 속도곡선을 V_{speed}라 하자. s_1에서 시작하는 V_{speed}의 가속곡선과 최적 속도곡선 사이에는 정리 1에 의해 $[s_1, s_2]$에서 $V_{speed} < V_{opt}$가 성립한다. 단, $s_a < s_2$이다. 접점 s_{tp}는 $s_{tp} \in (0, s_a)$이므로, s_{tp}에서 $V_{speed} < V_{opt}$이다. 따라서 속도곡선 V_{speed}는 조건2를 만족하지 않는다. 그리고, 구간 $[s_{tp}, s_2]$에서 $V_{speed} < V_{opt}$가 되므로 조건3도 만족하지 않는다. 따라서 접점이 초기 가속곡선상에서 형성되는 경우, 이동 속도 조절방법은 충돌 회피는 만족하나 최소 시간을 보장하지 않는다.

[정리 4] 접점 s_{tp}가 초기 가속곡선 이외의 지점에서 형성되는 경우, $s_{tp} \in (s_a, s_f)$일 때, 이동 속도조절법은 충돌회피와 함께 최소 시간을 만족한다.

[증 명] 새로운 속도 곡선 V_{speed}에 대한 경로를 π_s라 하자. 최대 가속과 감속을 반복하여 $s_2 < s_{tp}$을 만족하는 속도를 얻을 수 없을 때에는 최대 가속과 감속 한계내의 임의의 속도를 취하여 $s_2 < s_{tp}$을 만족하는 속도곡선 V_{speed}을 얻을 수 있다.

경로 π_0와 π_s에 대한 구간 $[s_{tp}, s_f]$에서 걸린 시간이 각각 t_r, t_r'일 때, 구간 $[s_2, s_f]$에서 $V_{opt} \equiv V_{speed}$이므로 $t_r = t_r'$이 성립하며, 조건2,3을 만족한다. 그리고, 또 알고리즘 1에서 지연된 속도 곡선 V_{speed}를 구할 때, $s = s_{tp}$에서 $t = t_{tp}$를 만족하는 속도곡선 V_{speed}를 구하였으므로 경로 π_s는 조건 1을 만족한다. 따라서 이동 속도조절법은 충돌회피와 함께 최소 시간을 만족한다. 변경된 경로 π_s는 s_f에서 시간이 $t_f^{speed} = t_{tp} + t_r' = t_0 + \Delta t + t_r = t_f + \Delta t$이 된다. 이는 시간지연법의 결과 $t_f^{delay} = t_f + \Delta t$와 같은 결과이다.

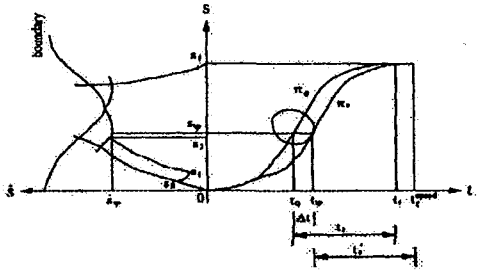

그림 2. 속도 조절에 의한 궤적 계획

3.2 하이브리드 최소시간 충돌회피 작업계획

작업 공간에서 여러 소작업을 수행하는 과정에서 이중암 로봇이 항상 동시에 작업대 사이를 이동하는 것은 아니다. 한 로봇이 작업대에 있을 때 다른 로봇은 이동하거나, 두 로봇이 같이 이동하고 있을 때도 있다. 이런 경우 충돌을 피하기 위해 시간 조절법만 사용한다면 이동하는 로봇은 충돌회피에 전혀 기여를 하지 못한다. 앞서 정리 2,3 및 4에 의해 시간지연법과 속도조절법 모두 최소시간을 동시에 만족하므로 충돌회피 동작계획에 시간지연법과 속도조절법을 다음의 알고리즘2와 같이 혼합하여 적용하면 두 로봇암 모두 충돌회피에 적용할 수 있다.

[알고리즘 2]

[단계 1] 주어진 작업에 대한 작업순서를 결정하기 위해 N+M개의 소작업에 대해 MTSP문제를 적용하여 로봇의 작업순서를 결정한다.

[단계 2] 작업대 사이의 경로에 대해 위상평면 기법을 이용하여 최적 속도 계획을 한다. 각 작업대 사이를 이동하는 최소 시간을 얻는다.

[단계 3] 작업 시작 시간을 기준으로 놓아 두 로봇암이 각각 작업대에 도달하는 시간에 대해 시간열(time sequence)을 구성한다. 그림 3.

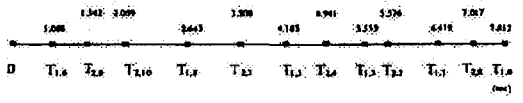

그림 3. 시간열

단, $T_{r,i}$는 로봇 r이 작업대 i에 도달할 때까지의

경과시간을 나타낸다.

[단계 4] 이동 구간에 대해 잠재적 충돌이 예상되는 시간 구간에 대해 s×t 공간을 구성하여 충돌 여부를 판단한다. 로봇암 r_1의 i번째 경로를 $D_{1,i}$라 할 때, 두 로봇암이 각각 $D_{1,i}, D_{2,j}$구간을 이동하는 시간은 시간열에서 볼 때 각각 $[T_{1,i}, T_{1,i+1}]$와 $[T_{2,j}, T_{2,j+1}]$시간 구간에 해당한다. 두 로봇암의 충돌은 공간 및 시간을 모두 고려한 것이므로 공간상의 경로 $D_{1,i}, D_{2,j}$이 겹치고 동시에 시간구간 $[T_{1,i}, T_{1,i+1}]$와 $[T_{2,j}, T_{2,j+1}]$이 겹치는 구간에서 잠재적 충돌이 일어난다.

[단계 5] 충돌이 발생하는 구간에서는 충돌 회피 동작 계획을 적용한다. 시간열에서 $T_{1,i}$는 로봇암 r_1이 i 작업대에 도착하는 시간이므로, 이 때 로봇암 r_1의 속도는 0이고, 로봇암 r_2는 이동하고 있으므로 이동속도는 0이 아니다. 따라서 시간구간 $[T_{1,i}, T_{2,j}]$에서 앞서 언급한 시간지연법과 속도조절법을 각각의 로봇암에 적용할 수 있다. 로봇 1에 시간 지연법을 적용하여 얻은 지연시간이 Δt_d, 로봇 2에 속도 조절법을 적용하여 얻은 지연시간이 Δt_v라 하면, 이 때,

1) $\Delta t_d < \Delta t_v$이면 시간구간에서 로봇암 r_1에 시간 지연법을 적용한다.

2) $\Delta t_d > \Delta t_v$이면 로봇암 r_2에 속도조절법을 적용한다.

충돌이 여러 구간에서 발생하면 각 구간에 대해 시간 지연법과 속도 조절법을 서로 비교하여 최소시간인 방법을 적용한다.

[단계 6] 충돌이 일어나지 않는 구간에서는 단계 2의 최적 속도로 이동한다.

4. 모의 실험

이중암 로봇을 대상으로 시간조절법과 속도 조절법이 모두 최소시간을 만족하는가를 입증하기 위해 충돌이 일어나는 경로를 설정하여 실험을 하였다. 충돌이 발생하는 로봇암 r_2의 $s \times \dot{s} \times t$공간은 그림 4과 같으며 최적 속도에 따른 최소시간은 1.467sec 이 다. 이 때, 접점은 (0.923 sec, 1.353m)이며, 최소지연시간은 0.128sec 이다.

시간지연법을 적용하여 얻은 결과는 그림 5과 같으며, 최소 시간은 1.595sec 이다. 속도 조절법을 적용한 결과는 그림 6과 같으며, 최소 시간은 1.595sec 이다. 이 때, 새로운 변환점은 (0.35m, 1.49m/sec), (0.63m 0.661m/sec), (1.219m, 2.456m/sec)이다.

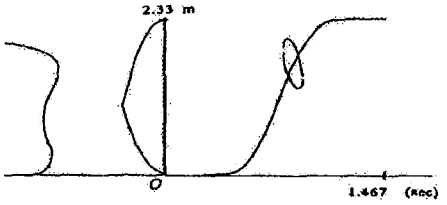

그림 4. 로봇 r2 의 원래의 궤적

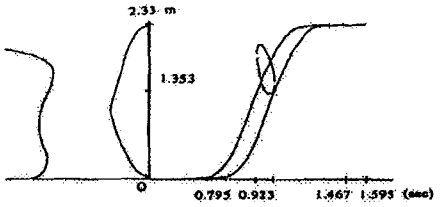

그림 5. 시간지연에 의한 궤적

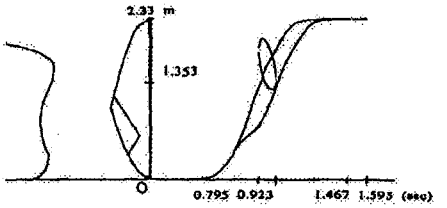

그림 6. 속도조절에 의한 궤적

두 번째 모의 실험에서는 10개의 소작업이 있는 작업공간을 설정하여 최소 작업시간을 구하는 실험을 한다. 표 1은 이중암 로봇의 구성을 나타내고 있다.

표 1 이중암 로봇의 구성

항 목		단위	SPEC	비고
동작영역	1'st Arm	deg	180	
	2'nd Arm	"	145	
	Z축	mm	150	
	R축	deg	±180	
Maximum Reach		mm	(350+260)	
Payload		Kg	2.5	고속시
최대합성속도		m/sec	5.4	1, 2축
반복위치정도	평면	mm	±0.05	1, 2축
	Z축	mm	±0.02	
	R축	deg	±0.05	
본체중량		Kg	100	
동시제어축수		EA	8축 (4+4)	(상 Arm+하 Arm)

표 2. 각 소작업대의 위치

작업대	위치(m,m)	작업대	위치(m,m)
subtask 1	1.8, 2.7	subtask 6	1.6, 0.9
subtask 2	2.5, 2.5	subtask 7	2.7, 1.0
subtask 3	1.1, 2.2	subtask 8	1.3, 0.2
subtask 4	3.0, 1.8	subtask 9	2.1, 0.4
subtask 5	1.0, 1.2	subtask 10	2.8, 0.3

위와 같이 주어진 작업공간에서 신경회로망으로 MTSP 해를 구하면 두 개의 페루프를 형성하게 된다. 그 결과 로봇 1은 6-8-5-3-1 순으로 작업을 수행하고, 로봇 2는 9-10-7-4-2 순으로 작업을 수행한다. 본 모의 실험에서는 충돌이 발생하지 않는 경로이다.

각 경로에 대해 최적 속도계획을 하여 얻은 최적 시간은 표 3과 같이 되며 이를 시간열로 나타내면 그림 7와 같다. 이 때, 얻은 최소 작업시간은 7.812sec 이다.

표 3. 경로 길이와 각 경로에 대한 최소 시간

로봇암 1			로봇암 2		
경로(sub task-sub task)	경로길이 (m)	최소시간 (sec)	경로(sub task-sub task)	경로길이 (m)	최소시간 (sec)
0-6	0.72	1.068	0-9	1.10	1.342
6-8	1.76	1.575	9-10	0.71	0.727
8-5	1.04	1.540	10-7	0.71	1.431
5-3	1.00	1.350	7-4	0.85	1.461
3-1	0.86	0.946	4-2	0.76	0.615
1-0	1.22	1.333	2-0	1.22	1.441

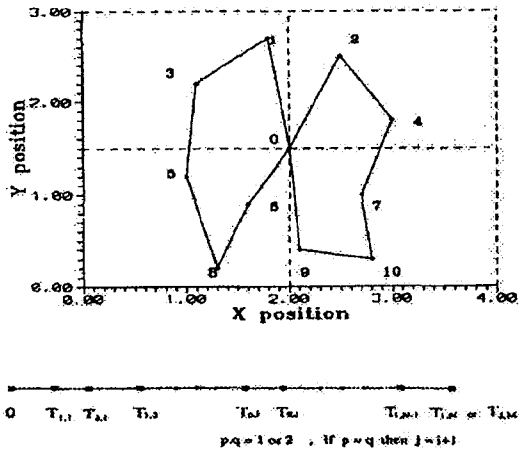

그림 7. 이중암 로봇의 작업 순서와 시간열

5. 결 론

여러 소작업으로 구성된 작업공간에서 작업하는 이중암 로봇의 최소시간 충돌회피 작업계획을 제시하였다. 시간지연법과 속도 조절법이 같이 최소시간을 만족한다는 사실을 이용하여 충돌 회피를 위해 시간 지연법뿐만 아니라 속도 조절법도 함께 적용할 수 있음을 보였다. 최소 지연시간은 충돌 영역의 경계선 정보와 최적 속도를 이용하여 얻을 수 있다. 최소 지연시간을 구하는 방법이 간단하고, 또 위상평면상에서 로봇의 동특성에 부합하는 지연된 속도 곡선을 구할 수 있어서 동특성이 다른 여러 가지 형태의 로봇에 제안된 궤적 계획 방법을 쉽게 적용할 수 있다.

참고 문헌

[1] B. H. Lee and C. S. G. Lee, "Collision-free motion planning of two robots", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. SMC-17, no. 1, pp.21-32, Jan.-Feb. 1987.

[2] K. G. Shin and N. D. Mckay, "Minimum-time control of robotic manipulators with geometric path constraints", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-30, no. 6, pp.531-541, Jun. 1985.

[3] Z. Bien and J. Lee, "A Minimum-time trajectory planning method for two robots", IEEE Trans. Robot.,Automat., vol. 8, no. 3, pp.414-418, Jun. 1992.

[4] C. Chang, M. J. Chung, and B. H. Lee, "Collision avoidance of two general robot manipulator by minimum delay time", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. SMC-24, no. 3, pp.517-522, Mar. 1987.

[5] J. J. Hopfield, "Neurons with graded response have collective computational properties like those of two state neurons", Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 81, pp.3088-3092, May. 1984.

[6] E. Wacholder, J. Han, and R. C. Mann, "An extension of the Hopfield-Tank model for solution of the multiple traveling salesmen problem" ,IEEE Intl. Conf. on Neural Network, vol. 2, pp.305-323, 1988.