

여유 자유도를 갖는 Robot Manipulator 최적 충돌 회피 경로 계획에 관한 연구 (Optimal Collision-Free Path Planning of Redundant Robotic Manipulators)

장민근(전남대 대학원), 기창두(전남대 기계공학과), 기석호(서강 전문대 소방학과)

M. K. Jang*(Graduate school, Chonnam Nat. Univ.), C. D. Kee(Chonnam Nat. Univ.), S. H. Ki(Sogang College)

ABSTRACT

A Potential Field Method is applied to the proposed algorithm for the planning of collision-free paths of redundant manipulators. The planning is carried out on the base of kinematic configuration. To make repulsive potentials, sources are distributed on the boundaries of obstacles. To escape from local minimum of the main potential and to attack other difficulties of the planning, various potentials are defined simultaneously. Inverse Kinematics Problems of the redundant manipulators are solved by unconstrained optimization method. Computer simulation result of the path planning is presented.

key words : collision-free path planning(충돌 회피 경로 계획), redundant manipulator(여유 자유도를 갖는 매니플레이터), potential field method, sink-source potential, optimization(최적화)

1. 서 론

매니플레이터의 end-effector 자유도는 매니플레이터 구조 자체에 의해 결정된다. 필요한 end-effector의 자유도 보다 조인트 변수(joint variable)들의 수가 더 많은 매니플레이터를 운동학적인 여유자유도(kinematic redundancy)를 갖는 매니플레이터라고 한다. 여유 자유도의 특징은 매니플레이터 역기구학의 해가 무한히 많을 수 있다는 것이며, 이는 충돌 회피 경로 계획에 유리한 조건이 된다. 충돌 회피 경로 계획은 보다 지능적이고 자율적인 로봇을 만들기 위한 기본 사항이다.

이 논문에서 다루는 충돌 회피 경로 계획 문제는 다음 3 가지로 요약된다. 첫째는 작업공간의 기본 좌표계에 대해 장애물이 차지하고 있는 공간을 나타내는 장애물 모델링의 완료, 둘째는 시작점(initial point)에서 목적점(goal point)까지 end-effector가 가야할 중간점(via-point)들을 설계하나, 각 점들에서 end-effector는 장애물과 충돌하지 않아야 되며 이웃하는 두 점은 도중에 충돌이 일어나지 않도록 충분히 가까워야 된다는 점, 마지막으로 계획된 각

점에서 end-effector를 그 점에 위치시키고 매니플레이터의 링크들이 장애물과 충돌하지 않는 조인트 변수들을 구하는 역기구학 문제를 푼다는 것이다.

장애물이 없는 공간들의 연결성(connectivity)을 직접 고려해서 로봇 경로를 계획하는 방법으로는 roadmap, 정확한 cell 분해(exact cell decomposition), 대략적인 cell 분해(approximate cell decomposition) 방법등이 있다.⁽¹⁾ 이 방법들과는 다른 경로 방법으로 포텐셜 필드 방법(potential field methods)⁽²⁾이 있으며 이 방법은 기하학적인 문제를 함수적인 문제로 바꾸고 현재 로봇이 위치한 점에서의 함수값의 국소적인 변화에서 얻은 장애물과 목적점에 대한 정보를 이용하여 경로를 계획하는 방법이다.

여러 종류의 포텐셜 필드를 이용하는 방법이 제안되었는데⁽³⁾ 포텐셜 필드 방법의 기본 개념은 장애물이 로봇에 반발력을 작용하도록 장애물에 가까이 갈수록 값이 커지는 반발 포텐셜(repulsive potential)과 목적점으로 로봇을 끌어 당기는 힘을 작용하기 위해 목적점으로 갈수록 값이 작아지는 수렴 포텐셜(attractive potential)을 합해 포텐셜 필드를 구성하

는 단계와 만들어진 포텐셜의 음의 그레디언트 방향으로 로봇에 힘이 작용(동력학적 경로 계획법⁽⁴⁾)하거나 그 방향으로 로봇이 움직인다(운동학적 경로 계획법)고 가정하고 경로를 계획하는 두 단계로 이루어진다.

반발력을 작용하는 포텐셜을 만들기 위해 Khatib⁽²⁾는 장애물을 나타내는 해석적인 수식과 장애물까지 최소 거리를 나타내는 거리 함수⁽⁵⁾를 이용하는 방법을 제안했는데 복잡한 장애물에 대해서는 적용하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 유체가 생성되는 점인 source들을 이용하는 방법을 제시하였다.

한편 포텐셜 필드 방법은 포텐셜이 감소하는 방향으로 경로를 설계하는 도중 목적점이 아닌 국소 최소점(local minimum)에 로봇이 갇혀버릴 수 있다는 단점이 있으나, 본 연구에서는 국소 최소점을 탈출하기 위한 포텐셜을 따로 정의하고, 경로 방향을 일정하게 유지하며 경로를 계획하는 방식(Direction Preserving Mode)을 도입하여 이를 극복하였다.

매니퓰레이터 링크들이 장애물과 충돌하지 않고 최대한 멀리 떨어지도록 하는 조인트 변수들을 구하기 위해 제한조건이 없는 최적화 기법을 이용하였으며, 제시된 경로 계획 방법들을 시뮬레이션하기 위한 Windows Program을 Borland C++ 컴파일러를 이용하여 개발하여 2 차원과 3 차원 작업공간에서의 경로 계획에 적용하였다.

2. End-effector 경로 계획을 위한 포텐셜 형성

2.1 Source와 Sink

유체가 솟아 나와 반경 방향으로 흘러 나가는 점을 source라 하고, 반대로 유체가 반경 방향으로 흘러 들어와서 끌려들어가는 점을 sink라 한다. Source에 가까워 질수록 포텐셜이 커지도록 하기 위해 여기에서는 유체 역학에서 정의되는 포텐셜과는 부호를 반대로 다음과 같이 정의한다.

$$\text{2 차원 source 포텐셜, } \phi = -\frac{M}{2\pi} \ln R$$

$$\text{3 차원 source 포텐셜, } \phi = -\frac{Q}{4\pi} \frac{1}{R}$$

여기서 M 은 2 차원 source 세기, Q 는 3 차원 source 세기, R 은 source와 떨어진 거리를 나타낸다.

Source 세기 M과 Q는 본 논문에서 경로 계획 알고리즘 유도 편의상 항상 1 로 하며, sink 포텐셜은

source 포텐셜과 부호만 다르게 정의한다.

2.2 주 포텐셜(Main potential)의 형성

End-effector 경로 계획을 위한 주 포텐셜을 만들기 위해 2 차원 장애물인 경우는 장애물 경계에, 3 차원 장애물인 경우는 장애물 표면에 source들을 불연속적으로 균일하게 분포시키고, 목적점에는 분포된 모든 source들의 세기를 합한 값과 같은 크기의 세기를 갖는 sink를 하나 배치한다. Source의 세기를 1 로 하고 분포된 source들의 수를 n 이라 하면 source들과 sink의 세기가 균형을 이루기 위해서는 목적점에 배치되는 sink의 세기는 n이 되어야함을 알 수 있다. 주 포텐셜이 만들어지는 과정을 살펴보기 위해서 sink와 source가 각각 하나씩만 있을 때를 먼저 고려한다[Fig. 1].

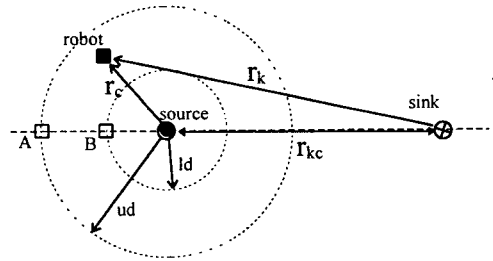


Fig. 1 Source and Sink potential configuration.

포텐셜의 음의 그레디언트 방향은 포텐셜이 가장 급격하게 감소하는 방향이며 로봇은 source와 sink로 이루어진 포텐셜의 음의 그레디언트 방향으로 이동한다. Source 포텐셜이 감소하는 방향은 source에서 멀어지는 방향이며, sink포텐셜이 감소하는 방향은 sink에 접근하는 방향이다. 즉 source는 미는 힘을 작용하고 sink는 끄는 힘을 작용한다고 생각할 수 있다. 로봇이 source와 sink 사이에 있을 때는 목적점인 sink쪽으로 이동하나, Fig. 1에서 A점과 같은 상황에 있을 때는 목적점에서 멀어지는 방향으로 이동하게 되는 데, 그 이유와 해결책은 다음과 같다.

먼저 Source 포텐셜 = $-\ln(r_c)/2\pi$,

Sink 포텐셜 = $\ln(r_k)/2\pi$ 가 되며,

sink 포텐셜과 source 포텐셜의 음의 그레디언트는 각각 $-1/(2\pi r_c)$, $1/(2\pi r_k)$ 이고, 그 크기는 로봇과의 거리에 반비례한다. Source가 sink보다 로봇에 더 가까운 곳에 있기 때문에 source에서 멀어지

는 방향은 sink 포텐셜 증가율보다 source 포텐셜 감소율이 커서 결과적으로 두 포텐셜을 합해서 구한 포텐셜이 감소하는 방향이 된다. 로봇은 포텐셜이 감소하는 방향으로 이동하기 때문에 목적점과는 계속해서 멀어지게 된다. 이와 같은 경우에 대비하여 source에서 ud만큼 떨어진 곳에서는 로봇이 더 이상 멀어지지 않고 source 포텐셜과 sink 포텐셜의 음의 그래디언트 크기가 균형을 이루도록 하기 위해 source 포텐셜에 비례 상수, $\beta = ud / (ud + r_{kc})$ 를 곱한다. 조정된 포텐셜 필드내에서는 로봇이 source에서 A점 방향으로 ud보다 멀리 떨어져 있는 경우와 ud보다 가까운 곳에 위치한 경우 모두 로봇은 ud만큼 떨어진 점으로 이동하게 됨을 쉽게 알 수 있다.

경로 계획을 위한 포텐셜을 만들기 위해서 source 세기가 위의 방식으로 조정된 source들을 장애물 경계에 불연속적으로 균일하게 분포시키고, 분포된 모든 source들의 세기를 합한 값과 같은 크기의 세기를 갖는 sink를 목적점에 배치한다. 위와 같은 포텐셜 필드에서 로봇이 목적점으로 부터 계속 멀어지는 문제는 해결되지만 넓은 영역에 분포되어 있는 source들 보다는 목적점에 위치한 sink가 상대적으로 큰 영향력을 갖게 되어 로봇이 장애물에 너무 가까운 곳으로 이동하거나 장애물과 충돌하는 경우가 발생한다. 로봇과 장애물사이에 두어야할 최소 거리인 ld보다 로봇이 장애물에 가까워지는 경우를 방지하고, 장애물과 멀리 떨어진 곳에서는 source 포텐셜과 sink포텐셜만이 영향력을 갖도록해서 장애물의 전체적인 형상과 목적점이 보다 효율적으로 고려된 경로를 계획하기 위해서, 장애물과 source와의 거리가 ld보다 작을 때는 포텐셜이 급격하게 증가하고 ld보다 클 때는 포텐셜이 반대로 급격하게 감소하는 방어 포텐셜(Shield potential)이 필요하다.

방어 포텐셜의 그래디언트 크기가 source에서 멀어질수록 감소하도록하기 위해서 방어 포텐셜의 그래디언트를 $c / (r_c)^p$ 와 같은 함수로 나타내면, c와 p는 다음과 같이 결정된다. Source에서 ld만큼 떨어진 곳에서의 sink 포텐셜의 그래디언트를 $1 / (2\pi r_k)$ 라 할 때, $r_{kc} \gg ld$ 라고 가정하면 $r_k \approx r_{kc}$ 가 되고, $c = -n / (2\pi r_{kc}) \cdot ld^p$ 로 하면, source에서 ld만큼 떨어진 곳에서 방어 포텐셜 그래디언트의 크기와 source 포텐셜 그래디언트 크기가 같게됨을 알 수 있다. $r_k \approx r_{kc}$ 라는 가정의 고차로 인해 실제로는 source에서 ld보다 ϵ 만큼 더 떨어진 곳에서 방어 포텐셜과 source 포텐셜의

그래디언트 크기가 같게되며, $\alpha = \epsilon / ld$ 라 할 때 $\alpha \ll 1$ 위해서는 $p \gg 1 / (2\alpha)$ 함을 알 수 있다. 요약하면, 방어 포텐셜(Shield potential)은

$$\frac{n}{2\pi r_{kc}} \cdot \frac{1}{p-1} \cdot \frac{ld^p}{(r_c)^{p-1}}$$

로 정의하며, 이 때 $p \gg 1 / (2\alpha)$ 이다.

위의 고차로 부터

반발 포텐셜(Repulsive potential)

$$= \sum (source \text{ 포텐셜} * \beta + \text{방어 포텐셜}),$$

수렴 포텐셜(Attractive potential)

로 정의하며 = 세기가 n인 sink 포텐셜

end-effector 경로 계획을 위한

주 포텐셜(Main potential)

= 반발 포텐셜 + 수렴 포텐셜 가 된다.

또한, 장애물들의 전체적인 형상에 대한 정보를 갖는 함수로 국소 최소점에서 탈출하기 위해 사용되는 포텐셜인

$$\text{형상 포텐셜(Shape potential)} = \sum source \text{ 포텐셜}$$

로 정의되며, 여기서 n 은 장애물에 분포된 source 의 수이다.

이와 같이 sink와 source를 사용해서 포텐셜을 만드는 방법의 장점은 두 점 사이 거리를 이용해서 포텐셜을 만들기 때문에 계산이 단순하고, 복잡한 장애물에 대한 포텐셜도 비교적 쉽게 계산할 수 있으며, 반발 포텐셜과 수렴 포텐셜을 체계적인 방법으로 정의할 수 있고, 장애물 전체 형상에 대한 정보를 갖는 형상 포텐셜을 정의하여 국소 최소점 탈출에 이용할 수 있으며, 장애물을 모델링하는 데 source point들을 직접 이용할 수도 있다는 점이다.

3. 역기구학을 위한 최적화 문제

3.1 최적화 기법

제한조건 아래서 목적 함수(objective function)를 최대화하거나 최소화하는 변수와 함수값을 구하는 방법이며

$$\text{목적함수 : } f(\vec{a}) = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

제한조건 :

$$h_i(\vec{x}) = 0; \quad i = 1 \text{ to } p$$

$$g_j(\vec{x}) \leq 0; \quad j = 1 \text{ to } q$$

로 나타낼 수 있다.

3.2 링크 포텐셜과 최적화 목적 함수정의

매니플레이터 링크들이 장애물과 충돌하지 않고 장애물과 멀리 떨어지도록 하는 조인트 변수들을 구하기 위해 최소화할 링크 포텐셜을 다음과 같이 정의한다.

$$\text{링크 포텐셜(Link potential)} = \sum^m \text{반발 포텐셜}$$

여기서 m 은 매니플레이터 링크들을 따라서 반발 포텐셜을 계산하는 점들의 수이다.

조인트 변수들을 나타내는 열 벡터를 \vec{q} , end-effector 위치를 나타내는 열 벡터를 \vec{r} 이라 하면 전방향 기구학(Forward Kinematics)은 벡터 함수 $\vec{F}(\vec{q}) = \vec{r}$ 를 구하여 \vec{q} 가 주어졌을 때 \vec{r} 을 구하는 문제이고, 역기구학(Inverse Kinematics)은 \vec{r} 이 주어졌을 때 \vec{q} 를 구하는 문제이며, End-effector가 정해진 위치 \vec{r} 에 있어야 한다는 제한조건을 만족시키면서 링크 포텐셜을 최소화하는 조인트 변수 \vec{q} 를 구하는 역기구학 문제는 제한조건이 있는 최적화 문제가 된다.

제한조건 $\vec{F}(\vec{q}) = \vec{r}$ 을 만족할 때만 0 의 값을 갖고, 제한조건을 만족하지 않으면 항상 0 보다 큰 값을 갖는 식 $[\vec{F}(\vec{q}) - \vec{r}]^T [\vec{F}(\vec{q}) - \vec{r}]$ 을 이용해 최적화를 위한 목적함수 $f(\vec{q})$ 를

$$\eta_1 * [\vec{F}(\vec{q}) - \vec{r}]^T [\vec{F}(\vec{q}) - \vec{r}] + \eta_2 * \text{링크 포텐셜}$$

(여기서 η_1, η_2 는 인수)

로 정의하면, 위의 역기구학 문제는 제한 조건이 없는 최적화 문제로 만들 수 있으며, Fig. 2는 end-effector 위치가 정해졌을 때 제한조건이 없는 최적화 기법을 이용하여 매니플레이터 링크들이 장애물과 충돌하지 않고 최대한 멀리 떨어지도록 하는 조인트 변수들을 찾는 과정을 보여주고 있다.

4. End-effector 경로 계획 알고리즘

End-effector 경로 계획은 여러 상황에 따라 포텐

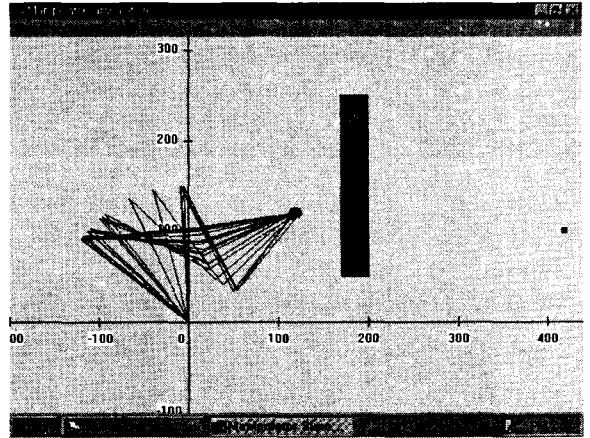


Fig 2. Searching for the joint variables with the end-effector fixed.

셜 감소 방식 (Potential Decreasing Mode) 또는 방향 유지 방식 (Direction Preserving Mode)으로 Fig. 3 과 같이 진행된다.

알고리즘에 사용된 몇가지 새로운 용어를 설명하면, 먼저 접공간(Tangent space)은 2 차원인 경우 방어 포텐셜의 그라디언트에 수직인 두 가지 방향을 의미하고, 3 차원인 경우 방어 포텐셜의 그라디언트에 수직인 평면을 말하며, 방향 유지 조건은 앞으로 이동할 방향 벡터와 바로 전에 이동했던 방향 벡터와의 내적이 양의 값을 갖는다는 조건이고, 마지막으로 복귀조건은 방향 유지 방식에서 포텐셜 감소 방식으로 다시 전환되기 위한 조건을 가리킨다.

본 연구에서는 경로 계획에 세 가지 탐색 방법을 이용하며, 첫 번째 방법인 그라디언트 탐색(Gradient search)은 주 포텐셜의 음의 그라디언트 방향으로 최소점을 찾는 방법이며, 두 번째 방법인 접공간 탐색(Tangent search)에서는 주어진 벡터를 접공간에 투사해서 얻은 방향으로 이동하는 방법이고, 마지막 방법인 무작위 탐색(Random search)에서는 방향 유지 조건과 현재 위치와 결정된 위치 사이에 장애물이 없어야 한다는 조건을 만족하는 점을 무작위로 탐색하는 방법이다.

제시된 경로 계획 방법을 컴퓨터로 시뮬레이션한 결과로, Fig. 4는 장애물이 여러 개 있을 때 여유 자유도를 갖는 매니플레이터의 충돌 회피 경로 계획 과정이며, Fig. 5는 3 차원 작업 공간에서 주 포텐셜의 극소 최소점을 탈출하는 end-effector 경로 계획 과정이다.

5. 결론

Source와 sink를 사용해 포텐셜을 만드는 방법과

그 장점을 알아 보았으며 운동학적으로 경로를 계획하였다. 국소 최소점을 탈출하기 위한 알고리즘을 제시하였으며 제한조건이 없는 최적화 기법을 이용해 매니플레이터 링크들이 가능한 한 장애물과 멀리 떨어져도록 하는 조인트 변수들을 구하였으며, 2차원과 3차원 작업 공간에서 충돌 회피 경로 계획을 시뮬레이션하여 제시된 방법들의 타당성을 확인하였다. 전체 경로에 대한 최적화(global optimization)와 제시한 방법들을 실시간 경로 계획에 응용하는 연구가 앞으로 더 진행되어야 할 분야이다.

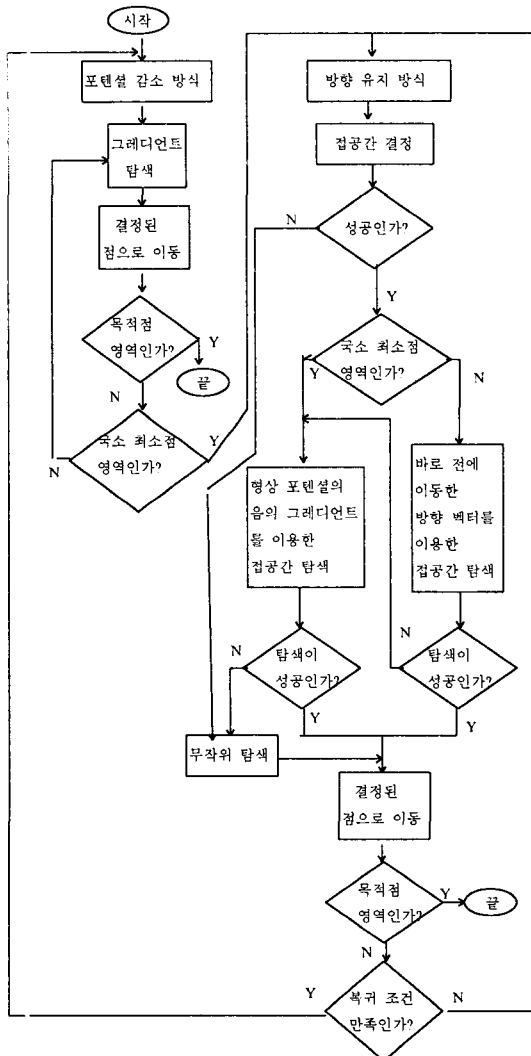


Fig. 3 End-effector path planning flowchart.

참고 문헌

(1) Jean-Claude Latombe, "Robot Motion Planning", Kuwer Academic Publishers.
 (2) O. Khatib, 1986, "Real-Time Obstacle Avoidance for

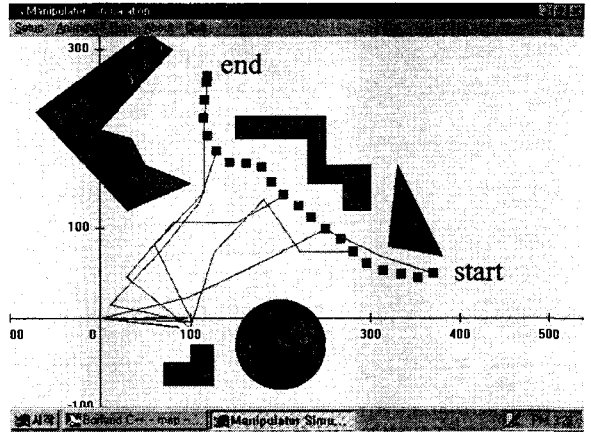


Fig. 4 Path planning of a 5-axis planar manipulator among obstacles.

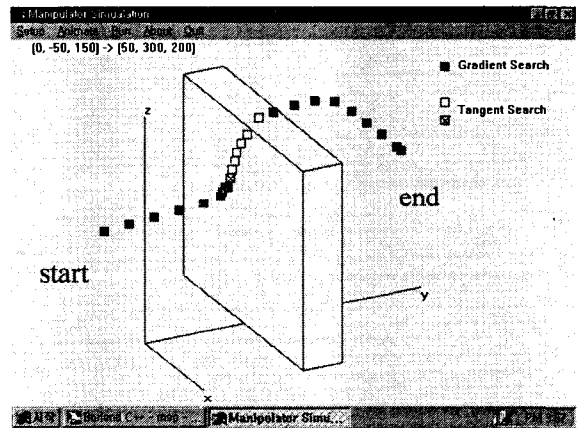


Fig.5 End-effector path planning in 3D workspace

Manipulators and Mobile Robots", Int. J. Rob. Res., Vol. 5, No 1, pp.90-98.
 (3) J. Chuang, 1993, "Potential-Based Modeling Of Three Dimensional Workspace for Obstacle Avoidance", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. p19-24.
 (4) Miroslaw Galicki, 1992, "Optimal Planning of a Collision-free Trajectory of Redundant Manipulators", Int. J. Rob. Res., Vol. 11, No 6, pp.549-559.
 (5) Gilbert, E. G., and Johnson, D. W., 1985, "Distance functions and their application to robot path planning in the presence of obstacles. IEEE J. Robot. Automation, pp.21-30.
 (6) Robert J. Schilling, 1990, "Fundamentals of Robotics : analysis and control", Prentice Hall.
 (7) Jasbir S. Arora, 1989, "Introduction to Optimum Design", McGRAW-HILL.