

〈論 文〉

로봇 팔의 최적설계에 관한 연구

조선휘* · 김기식** · 문흥기*** · 김영진***

(1990년 6월 20일 접수)

A Study on the Optimal Design of Robot Arm

S.W. Cho, K.S. Kim, H.K. Moon and Y.J. Kim

Key Words : Robot Manipulator(로봇 매니플레이터), Optimal Technique(최적화 기법), Optimal Link Length Ratio(최적 링크 길이 비), Joint Torque(조인트 토크), Joint Energy(조인트 에너지)

Abstract

Determining the motion using optimal technique about traveling time and trajectory planning has been studied often in recent years, but the study of determining the optimal robot dimensions is rare. In this paper, the authors attempt to find out the least driving torques and energy as the optimization of link length ratio referred to 2R SCARA and 3R robot manipulators. For the given linear path with triangular velocity profile, the inverse kinematic and dynamic problems are examined in order to lead into solution of problem, which is suggested for optimal design of link lengths. Accordingly, optimal link length ratio is obtained with respect to each case.

1. 서 론

로봇 매니플레이터(manipulator)의 기구학적 및 동력학적 해석은 Craig⁽¹⁾, Paul⁽²⁾, Duffy⁽³⁾, Ranky⁽⁴⁾ 등에 의하여 보고되었다. 한편 로봇의 운동은 비선형 식으로 표현되므로 이를 최적화하려는 방향으로 연구가 많이 이루어지고 있다. 그러나 이들의 대부분은 로봇의 형상이 주어졌을 때 운전시간을 최소화⁽⁵⁾하거나 운전 토크(torque)를 최소화하는 경로 계획(trajjectory planning)을 하는 것이며⁽⁶⁻⁸⁾ 링크의 길이를 결정하는 연구는 매우 희소하다.

첫번째로 SCARA 형태의 2관절 로봇 매니플레이터에 대하여 운동 토크와 에너지의 관점에서 이를 최소화하는 각 링크의 길이 비를 구하고 이 결과

를 Roth의 시간 최적화의 결과^(9,10)와 비교하였다. 다음으로 보통 6 자유도를 갖는 수직관절형 로봇은 특수한 손목 구조를 갖는 경우를 제외하고는 공간 상에서 모든 위치에서 임의의 자세를 가지고 운동할 수 있으나 이 자유도를 모두 포함한 해석은 매우 복잡하고, 또한 보통의 로봇에 있어서 베이스로부터 3개의 링크까지는 위치를 결정하고 그 뒤의 링크는 자세를 결정하므로 주로 로봇의 구동을 위한 필요 에너지 해석에서는 처음 3개의 링크까지만을 다루어도 별로 지장이 없다. 그러므로 본 연구에서는 3절 링크 매니플레이터에 대하여 운동 에너지나 토크 관점에서 이를 최소화하는 각 링크의 길이를 결정하였다.

또한 주어진 작업을 수행할 때 필요한 매 순간의 조인트 토크를 구하고 이때 필요한 에너지와 토크를 최소화하는 링크의 길이를 구하였다. 이 때 작업은 직선 경로로 하고 속도선도로는 일반적인 경우로서 삼각형을 선택하였다.

* 정희원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

** 한국산업안전공단

*** 서울대학교 대학원

그리고 연구의 내용은 2R SCARA 형태와 수직 관절형 3R 링크 매니플레이터의 기구학적 해석, 동역학적, 해석, 최적화 문제로 나눌 수 있다. 3절 링크 매니플레이터의 경우 가장 널리 쓰이는 방식은 RRR 형식과 RRP 형식이라 할 수 있는데 이중 RRR 형식에 대하여 연구를 수행하였다.

2. 기구학적 해석

기구학적 해석으로는 조인트 변수로부터 끝점의 위치를 구하는 기구학적 문제(forward kinematic problem)와 끝점의 위치로부터 각 조인트 변수를 구하는 역기구학 문제(inverse kinematic problem)로 나눌 수 있다. 본 연구는 임의의 운동을 지정하여 주고, 이 운동을 행하는데 필요한 각 조인트 변수의 변위, 속도, 가속도를 구하는 역 기구학 문제로서 Hollerback/Sahar의 방법⁽¹¹⁾으로 이들 값을 구하였다. 이 방법은 자코비안 행렬(Jacobian matrix)을 이용하는 방법보다 계산시간이 적게들어 최적화 문제를 해결하는데 있어서 매우 유리하다.

3. 동력학적 해석

기구학적 해석으로 구한 조인트의 변위, 속도, 가속도로 각 조인트의 구동 토오르크를 구하기 위하여는 로봇 매니플레이터의 동력학 문제를 풀어야 하고, 이 방법으로는 Newton-Euler방정식을 이용하는 방법과 Lagrange-Euler 방정식을 이용하는 방법 등이 있다.

두 가지 방법 중 Newton-Euler방정식을 이용하는 방법은 프로그래밍이 간단하지만 매 순간 반복적으로 토르크를 구하기 때문에 최적화 문제를 해결하는 데에는 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 본 논문에서는 최적화 문제를 해결하는 데 시간이 적게 걸리도록 Lagrange-Euler 방정식을 사용하여 각 조인트 토르크를 식 (1)에서와 같이 다항식 형태(closed form)로 구성하였다.

$$\tau(t) = D(q(t)) \ddot{q}(t) + H(q(t), \dot{q}(t)) + C(q(t)) \quad (1)$$

여기서 $\tau(t)$: Torque vector

$D(q)$: Inertial acceleration-related matrix

$H(q, \dot{q})$: Nonlinear Coriolis, centrifugal force vector

$C(q)$: Gravity loading force vector

이다.

4. 최적화 문제

4.1 최적화 방법

로봇의 기구학 및 동력학을 표시하는 식은 많은 비선형 항을 포함하므로 최적화 방법을 결정하는 문제는 중요한 일이다.

최적화 기법은 부등과 항등 제한 조건을 만족하는 범위 내에서 목적함수 U 를 최소화하거나 최대화하는 설계변수 값을 찾는 방법이다. 본 연구에서는 비선형이고 제한 최적화 문제를 다루게 되므로, Rosenbroc Minimization Technique, Flexible Polyhedron Search 방법⁽¹²⁾ 그리고 Fletcher-Powell 방법⁽¹³⁾를 비교하여 그중 복잡한 비선형 문제를 해결하는데 유리하고 수렴성이 좋은 Fletcher-Powell 방법을 사용하였다.

Fletcher-Powell 방법은 Davidon에 의해 제안되고 Fletcher와 Powell에 의해서 수정된 방법으로 일반함수(general function)의 최적화 문제를 해결하는데 매우 유용한 방법이다. 이 방법은 conjugate direction을 계산할 뿐 아니라 목적함수의 일차 미분값만을 계산함으로써 이차 미분값을 추정하여 탐사 방향을 찾는 방법이다⁽¹³⁾. 또한 이 방법은 mixed interior-exterior 벌칙함수(penalty function)를 이용하여 제한 최적화 문제를 무제한 최적화 문제로 바꾸어 최적치를 찾는 방법을 취하였다.

4.2 목적함수

로봇 매니플레이터가 작업영역 내의 두점 사이를 직선운동할 때 두 가지의 경우-토르크의 관점과 에너지의 관점에 대하여 목적함수를 설정하여 각각 최적화 작업을 수행하였다.

우선 토르크의 관점에서, 사용하는 목적함수는 다음과 같다.

$$U = \int_t (\sum \tau_i^2) dt \quad (2)$$

그리고 에너지의 관점에서 사용하는 목적함수는 다음과 같다.

$$U = \int_t (\sum \tau_i \dot{\theta}_i) dt \quad (3)$$

토크나 에너지의 관점으로 설정한 목적함수에서 로봇이 움직이는 경로와 속도선도가 주어지면, 기구학적 해석과 동역학적 해석을 통하여 조인트 토크 τ 와 조인트 각속도 $\dot{\theta}$ 는 링크 길이만의 함수로 나타낼 수 있다. 목적함수는 링크 길이만의 함수로 표시될 수 있으며 따라서 최적화 작업을 통하여 각 목적함수를 최소화하는 각 링크의 길이와 그 비를 구할 수 있다.

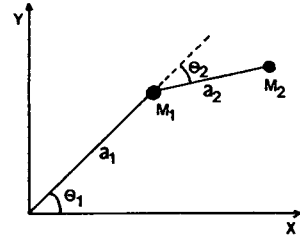


Fig. 1 Model of 2R SCARA robot manipulator

5. 결과 및 고찰

로봇의 운동을 두점 사이를 삼각형 속도선도를 가진 직선운동으로 정하고 운동에 필요한 조인트의 구동 토크를 구하여, 토크의 관점 그리고 에너지의 관점에서 목적함수를 설정하고 이를 최소화하는 링크의 길이를 구하였다.

5.1 2R SCARA 형태의 로봇 매니퓰레이터

SCARA 형태의 로봇 매니퓰레이터를 Fig. 1에 표시하였다. 이 모델은 Roth가 최대 조인트 토크를 주고 시간 최소화 작업을 하여 링크 길이를 구할 때의 모델과 동일한 것이다^(9,10).

Fig. 1의 모델로 운동 토크와 에너지의 관점에서 최적화 작업을 수행하였다. 우선 토크의 관점에서 구한 링크 길이의 비(a_2/a_1)는 거의 모든 경로에서 1에 가까운 값이 최적이고 에너지의 관점에서는 큰 편차를 나타내고 있다. Roth는 끝쪽의 링크가 가운데 쪽 링크보다 커지는 것이 시간 최적화의 관점에서 좋다고 하였는데 본 논문에서 다른 토크나 에너지의 관점에서는 SCARA 형태의 로봇은 링크

길이의 비가 1인 것이 바람직한 결과가 됨을 알게 되었다.

Table 1에서 보는 바와 같이 여러가지 경로에 대하여 링크 길이를 최적화 시켜보면, 토크에 대하여 설정한 목적함수를 사용하였을 경우 두 링크 길이의 합이 경로중 가장 먼곳의 거리와 거의 같아진다. 그러나 에너지의 관점에서는 두 링크의 길이의 합이 경로중 가장 먼곳의 거리보다 약 2~3배 정도 커진다. Roth의 논문에서는 두 링크 길이의 합이 경로중 가장 먼곳의 거리와 같아진다는 것이 토크의 경우와 일치한다. 따라서 두 링크의 길이의 비(a_2/a_1)는 1이 최적이지만 길이를 결정하려면 조작 성능(manipulability)이나 워크 스페이스(work space) 등에 대한 연구가 뒤따라야 하겠다.

목적함수의 값을 비교하여 보면 토크 또는 에너지에 대한 경우 동일하게 원주방향의 경로보다는 반경방향의 목적함수의 값이 작음을 알 수 있다 (Table 1). 즉 작업이 주어졌을 경우 가능한한 로봇의 설치 위치와 작업을 일직선상에 일치시키는 것이 유리하다. 이 결과는 Roth의 시간 최적화 결

Table 1 Optimal link ratio (a_2/a_1) and objective function values with starting point (5, 0, 1)

Ending point (x,y,z)			Torque			Energy		
			$\frac{a_2}{a_1}$	$\frac{a_1+a_2}{F}$	Obj	$\frac{a_2}{a_1}$	$\frac{a_1+a_2}{F}$	Obj
1.000	0.000	1.000	1.114	1.070	721.39	1.119	2.665	20.99
1.136	1.035	1.000	1.118	1.064	1136.21	1.052	3.115	22.05
1.536	2.000	1.000	1.043	1.053	1747.40	1.080	2.594	23.70
2.172	2.828	1.000	0.985	1.041	2424.09	1.200	2.255	23.97
3.000	3.464	1.000	0.963	1.029	3032.76	1.280	2.113	25.11
3.965	3.864	1.000	1.019	1.013	3585.00	1.221	1.977	25.68
5.000	4.000	1.000	1.186	1.021	3922.07	1.080	2.114	26.09

F : Farthest length from base pivot to path point

과와 일치한다.

2R SCARA 형태의 로봇에 대한 최적화 결과중 시작점이 (5, 0, 1)이고 경로의 길이가 4인 경우에 대하여 토크와 에너지의 관점에서의 링크 길이의 비를 Fig. 3에 원통 좌표계로 나타내었다.

5.2 수직 관절형 3R 로봇 매니퓰레이터

수직 관절형 3R 로봇 매니퓰레이터를 단순화하여 Fig. 2에 나타내었다. 이 모델에서 각 링크의 질량은 길이 방향으로 일정하게 분포하여 결국 질량은 길이에 비례하도록 하였다. 또한 이때 편의상 각 링크의 단위 길이당 질량을 같은 것으로 하여 계산을 수행하였다.

목적함수를 최소화하도록 설계변수, 즉 3링크의 길이 (a_1, a_2, a_3)를 구하여 보면 끝점의 운동이 첫 번째 링크의 운동축을 포함한 평면에 있는 경우 첫 번째 링크의 질량 및 관성 모멘트가 토크 및 에너지에 영향을 미치지 않게 되므로 a_1 은 설계변수로서의 의미가 없어진다. 또한 끝점의 운동이 위와

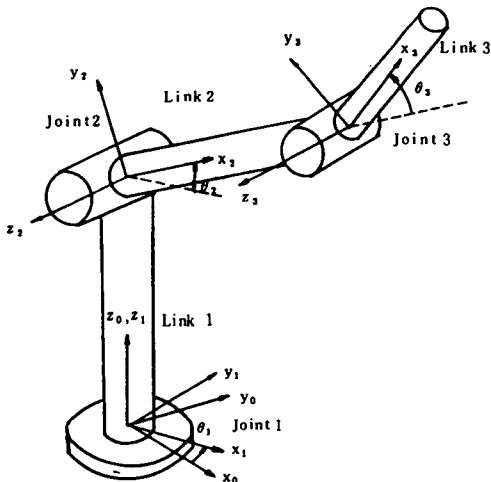


Fig. 2 Model of 3R robot manipulator

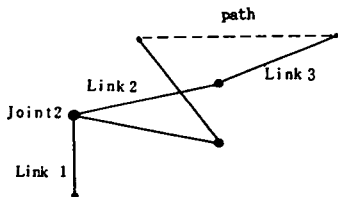


Fig. 3 Optimal configuration of 3R robot manipulator

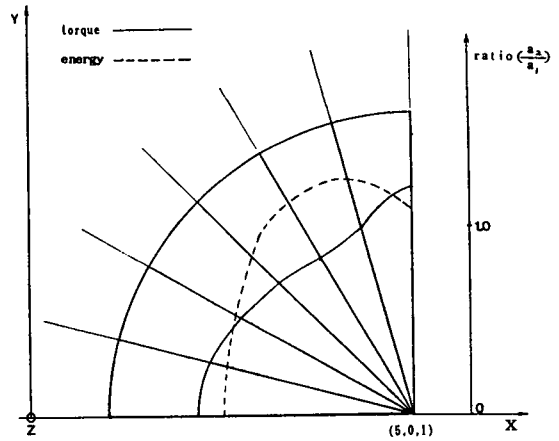


Fig. 4 2R SCARA type optimal link length ratio (a_2/a_1) with path length 4

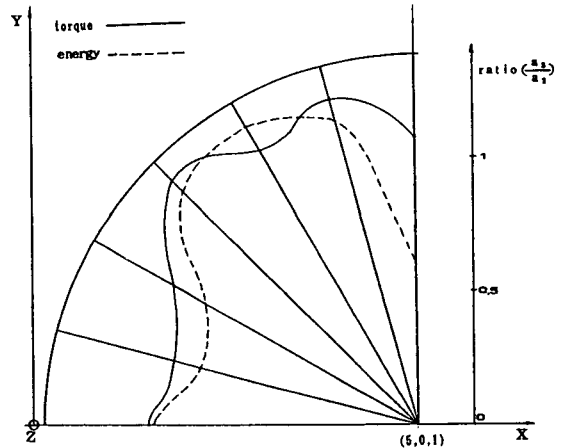


Fig. 5 Optimal link length ratio (a_3/a_2) at $Z=1$ with path length 4.9

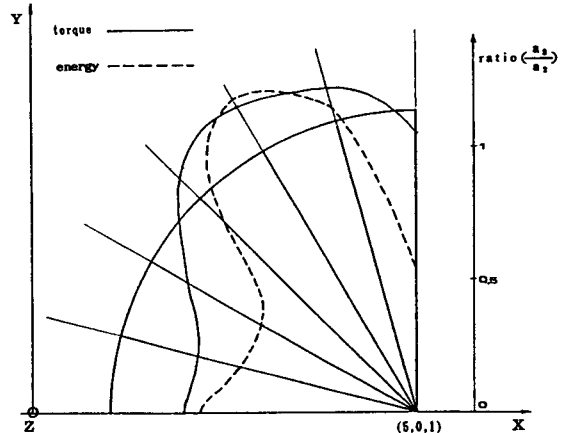


Fig. 6 Optimal link length ratio (a_3/a_2) at $Z=1$ with path length 4

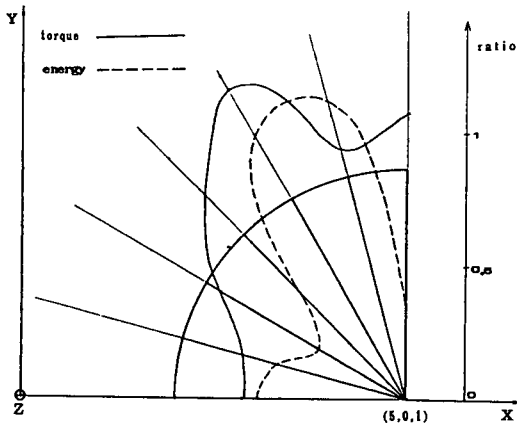


Fig. 7 Optimal link length ratio (a_3/a_2) at $Z=1$ with path length 3

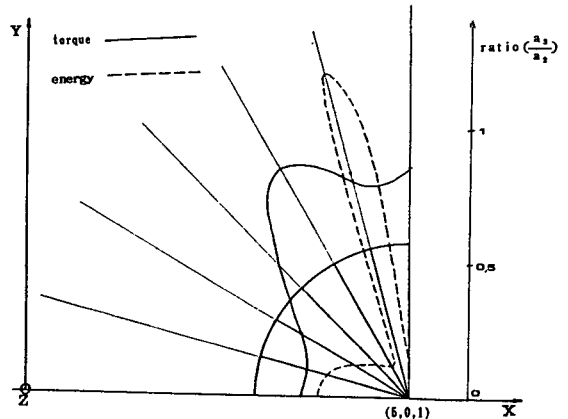


Fig. 8 Optimal link length ratio (a_3/a_2) at $Z=1$ with path length 2

갈지 않을 경우는 a_1 은 항상 0에 수렴하였다. 따라서 본 연구에서는 편의상 a_1 을 단위 길이에 고정시키고 두번째 및 세번째 링크의 길이 (a_2, a_3)만을 설계 변수로 하였다.

여러가지 경로를 주고 링크의 길이를 최적화 시켜보면 Fig. 3에서와 같이 경로중에서 조인트 2와 가장 먼점에서 링크 2와 링크 3이 거의 퍼진 형태에서 목적함수가 최소가 된다. 이때 링크 2와 링크 3의 길이의 합이 조인트 2에서 경로중 가장 먼점까지의 거리보다 최고 10%정도 커진다. 이와 같은 결과는 두 링크가 완전히 퍼진 위치가 특이점 (singular point)이기 때문에 이 위치 근처에서 토크가 급격히 큰 값을 나타내게 때문이다.

Fig. 4에서 Fig. 8까지는 한 운동 시작점 (5, 0, 1)에서 수평한 여러가지 경로를 주었을 때의 링크 길이의 비 (a_3/a_2)를 나타냈다. 이 그림들에서 반경방향의 짧은 직선은 경로를 나타낸 것이고 이 경로에 따른 링크 길이의 비를 원통 좌표계로 나타낸 것이다. Table 2에서 한 운동 시작점에서 경로 길이가

4인 여러 가지 경우의 최적 링크의 비와 그와 관계되는 값을 나타내었다.

Roth^(9,10)에 의하면 SCARA 형태의 매니플레이터에서 조인트의 최대 구동 토크를 주고 운행시간이 최소로 되는 링크길이를 구하였을 때, 경로중 로봇 중심축에서 가장 먼 점에서 링크가 퍼지는 형태이고 바깥쪽 링크의 길이가 안쪽 링크의 길이보다 길어지는 것이 유리하다고 하였다. 그러나 토크와 에너지의 관점에서 링크의 길이를 최적화 하였을 경우에는 경로중 가장 먼곳에서 링크 2와 링크 3이 퍼지는 것은 동일한 결과를 나타내지만 링크 길이의 비는 주어진 경로에 의하여 결정된다. 또한 Roth는 운동 경로는 베이스 피봇 (base pivot)을 중심으로 원주 방향의 운동보다 반경 방향의 운동이 운행 시간의 관점에서 유리하다고 하였는데 이는 본 연구 결과와 일치한다. 따라서 작업이 주어저있는 경우 로봇은 가능한 한 로봇의 베이스 축과 운동경로를 같은 평면 상에 일치시키는 것이 토크, 에너지, 운전시간의 관점에서 모두 유리하다.

Table 2 Optimal link length ratio (a_3/a_2) and its characteristic values with starting point (5, 0, 1)

Ending point			Torque			Energy		
			A	B	C	A	B	C
5.000	0.000	5.000	0.129	5.676	0.741	0.127	3.533	0.773
5.000	0.000	-3.000	0.153	22.233	0.714	0.247	82.466	0.785
3.965	0.000	-2.684	0.086	24.568	0.350	0.103	46.218	0.138
3.000	0.000	-2.464	0.074	3.199	0.001	0.076	5.040	0.000
2.172	0.000	-1.828	0.176	2.107	0.001	0.179	4.906	1.146

1.536	0.000	-1.000	0.337	3.071	1.342	0.339	4.206	1.999
1.136	0.000	-0.035	0.565	7.204	2.792	0.558	7.029	3.700
1.000	0.000	1.000	0.867	21.460	4.607	0.805	16.764	4.714
1.136	0.000	2.035	1.131	61.770	5.563	0.850	41.159	6.378
1.536	0.000	3.000	1.064	116.474	4.062	0.725	79.138	5.650
2.172	0.000	3.828	0.237	31.523	0.652	0.407	100.275	1.422
3.000	0.000	4.464	0.088	20.593	0.257	0.096	31.081	0.122
3.965	0.000	4.864	0.073	8.030	0.572	0.071	4.092	0.001
4.000	-0.268	-2.864	0.088	24.681	0.355	0.107	48.622	0.165
3.068	-0.518	-2.464	0.069	4.008	0.001	0.071	6.968	0.000
2.268	-0.732	-1.828	0.161	2.694	0.001	0.159	1.654	0.001
1.654	-0.897	-1.000	0.296	2.294	0.933	0.297	2.929	1.276
1.268	-1.000	-0.035	0.156	13.086	2.427	0.464	5.176	2.235
1.136	-1.035	1.000	0.843	38.557	4.931	0.683	22.705	4.663
1.268	-1.000	2.035	1.238	91.727	6.820	0.915	67.609	8.133
1.654	-0.897	3.000	1.381	170.416	5.091	0.787	106.329	5.570
2.268	-0.732	3.828	0.207	27.746	0.492	0.361	98.990	1.162
3.068	-0.518	4.464	0.080	19.007	0.223	0.085	26.841	0.099
4.000	-0.268	4.864	0.075	7.805	0.578	0.073	3.653	-0.004
4.103	-0.518	-2.864	0.095	25.516	0.387	0.119	52.986	0.193
3.268	-1.000	-2.464	0.061	16.588	0.001	0.057	8.675	0.001
2.551	-1.414	-1.828	0.126	7.065	0.001	0.122	3.866	0.000
2.000	-1.732	-1.000	0.330	46.751	0.001	0.207	1.142	0.001
1.654	-1.932	-0.035	0.583	66.492	1.879	0.305	3.636	0.001
1.536	-2.000	1.000	0.977	108.368	4.492	0.663	66.235	3.315
1.654	-1.932	2.035	1.421	179.113	7.211	0.796	107.113	5.336
2.000	-1.932	2.035	1.421	179.113	7.211	0.796	107.113	5.336
2.551	-1.44	3.828	0.145	20.834	0.225	0.225	76.118	0.465
3.268	-1.000	4.464	0.059	13.477	0.151	0.057	9.032	0.034
4.103	-0.518	4.864	0.080	7.574	0.609	0.081	3.226	-0.002
4.268	-0.732	-2.864	0.107	26.653	0.446	0.142	63.198	0.278
3.586	-1.414	-2.464	0.070	34.592	0.260	0.072	37.727	0.029
3.000	-2.000	-1.828	0.109	46.543	0.001	0.079	9.240	0.000
2.551	-2.449	-1.000	0.331	137.420	0.001	0.128	8.636	0.000
2.268	-2.732	-0.035	0.757	225.892	1.969	0.412	116.634	0.001
2.172	-2.828	1.000	1.248	297.318	4.761	1.019	262.399	5.132
2.268	-2.732	2.035	1.668	394.788	6.682	1.264	354.532	9.749
2.551	-2.449	3.000	1.378	471.405	3.240	0.723	312.426	2.935
3.000	-2.000	3.828	0.083	14.528	0.024	0.095	29.882	0.105
3.586	-1.414	4.464	0.055	7.012	0.293	0.056	8.945	0.010
4.268	-0.732	4.864	0.089	7.138	0.670	0.084	1.873	0.007
4.482	-0.897	-2.864	0.122	27.493	0.518	0.174	73.253	0.396
4.000	-1.732	-2.464	0.106	47.858	0.380	0.135	82.475	0.228
3.586	-2.449	-1.828	0.116	114.206	0.342	0.099	84.699	0.148
3.268	-3.000	-1.000	0.280	343.233	0.001	0.133	137.868	0.000
3.068	-3.346	-0.035	0.787	619.719	1.634	0.525	458.838	0.000
3.000	-3.464	1.000	1.327	784.740	3.931	1.368	834.819	8.404
3.068	-3.346	2.035	1.293	833.191	2.934	1.068	773.190	5.177
3.268	-3.000	3.000	0.057	9.892	0.011	0.063	19.824	0.012

3.586	-2.449	3.828	0.054	6.204	0.204	0.056	8.259	0.010
4.000	-1.732	4.464	0.074	6.250	0.375	0.073	4.627	0.000
4.482	-0.897	4.864	0.100	6.344	0.747	0.096	1.998	0.150
4.732	-1.000	-2.864	0.142	28.834	0.622	0.212	81.420	0.605
4.482	-1.932	-2.464	0.161	62.797	0.625	0.226	116.671	0.663
4.268	-2.732	-1.828	0.338	234.016	1.138	0.283	191.411	1.138
4.103	-3.346	-1.000	0.792	552.767	2.701	0.490	383.356	2.185
4.000	-3.732	-0.035	1.211	778.283	4.709	0.894	661.691	5.356
3.965	-3.864	1.000	1.269	815.769	4.395	1.196	812.715	6.880
4.000	-3.732	2.035	0.877	631.092	2.147	0.319	270.294	0.000
4.103	-3.346	3.000	0.080	6.995	0.237	0.082	9.437	0.000
4.268	-2.732	3.828	0.087	5.478	0.337	0.086	4.118	0.007
4.482	-1.932	4.464	0.099	5.123	0.518	0.095	1.434	0.006
4.732	-1.000	4.864	0.113	5.465	0.861	0.110	2.291	0.384
5.000	-1.035	-2.864	0.166	30.900	0.754	0.254	86.267	0.863
5.000	-2.000	-2.464	0.263	92.453	1.124	0.302	114.487	1.249
5.000	-2.828	-1.828	0.766	308.772	3.285	0.424	178.299	2.434
5.000	-3.464	-1.000	1.161	419.716	5.982	0.501	214.152	3.124
5.000	-3.864	-0.035	1.269	445.702	6.909	0.670	281.239	4.150
5.000	-4.000	1.000	1.097	399.079	4.642	0.536	226.501	2.542
5.000	-3.864	2.035	0.745	298.862	2.380	0.165	29.656	0.003
5.000	-3.464	3.000	0.125	2.039	0.446	0.124	0.877	0.003
5.000	-2.828	3.828	0.126	2.468	0.541	0.123	0.125	0.003
5.000	-2.000	4.464	0.127	3.286	0.720	0.123	0.105	0.003

$A : a_3/a_2$, $B : \{2a_3/(F-N) - 1\} * 100(\%)$, $C : \{(a_2+a_3)/F - 1\} * 100(\%)$,

$F : \text{Farthest length from joint 2 to path}$, $N : \text{Nearest length from joint 2 to path}$

4. 결 론

2R SCARA 형태의 로봇과 3R 수직관절형 로봇의 구동 토크 및 에너지에 대한 링크 길이를 최적화하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 링크 길이로서는 2R SCARA 및 3R 수직관절형 다 같이 끝점의 경로 중 가장 먼 점에서 퍼진 형태가 되는 것이 구동 토크, 운동 에너지, 운행 시간에서 유리하다. 그러나 집중질량으로 가정된 SCARA 형태의 매니플레이터는 에너지의 관점에서 상이한 결과를 나타내었다(Table 1).

(2) 2R SCARA 형태의 로봇 매니플레이터는 두 링크 길이의 비(a_2/a_1)가 1이 되는 것이 토크와 에너지의 관점에서 유리하다.

(3) 2R SCARA와 3R 수직관절형 로봇의 운동 경로는 가능한한 베이스 피봇을 통과하는 평면 상에 있는 것이 토크, 에너지, 운전시간의 관점에서

유리하다(Table 1, Table 2).

(4) Fig. 5~Fig. 8은 특정 작업을 반복적으로 수행하는 3R 형태의 로봇의 설계시 도움이 되는 자료로 이용 가능하며 Table 2는 기존의 로봇이 있을 경우 설치 위치를 정하는 데에 도움이 될 수 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 일반 연구 프로그램에 의하여 완성되었으며 재단 측 관계되는 분들에게 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- (1) John, J. Craig, 1986, Introduction to Robotics, Addison-Wesley Publishing Company.
- (2) Richard, P. Paul, 1982, Robot Manipulators, The

MIT Press.

- (3) Duffy, J., 1980, Analysis of Mechanisms and Robot Manipulators, Edward Arnold.
- (4) Ranky, P.G., Ho, C.Y., 1985, Robotics Modelling, IFS Ltd. UK Springer-Verlag.
- (5) Kahn, M. E., and Roth, B., 1971, "The Near-Minimum Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chain", "Trans. of the ASME, J. of Dynamic System, Measurements and Control, pp. 164 ~172.
- (6) Vukobratovic, M., and Kircanski, M., 1982, "A Method for Optimal Synthesis of Manipulator Robot Trajectories", Trans. of the ASME, J. of Dynamic Synthesis, Measurements and Control, Vol. 104, pp. 188~193.
- (7) Luh, J.Y.S. and Lin, C.S., 1981, "Optimum Path Pranning for Mechanical Manipulators", Trans. of the ASME, J. of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol. 102, pp. 142~151.
- (8) Kim, Y.I., 1984, "A Study of the Optimal Motion Analysis of the Robot manipulator with Three Links", Ms. D., Seoul National Univ.
- (9) Scheinman, V. and Roth, B., 1984, "On the Optimal Selection and Placement of Manipulators", Theory and Practice of Robots and Manipulators, Procs. of RomanSy '84; The Fifth CISM.IFTOMM Symposium.
- (10) Roth, B., 1985, "Control and Mechanics of Simple Manipulator System", Robotics Reserch, The Second International Symposium.
- (11) John, M., Hollerbach, Gideon Sahar, 1983, "Wrist-Partitioned inverse Kinematic Accelerations and Manipulator Dynamics", The Journal of Robotics Reserch, Vol. 2, No. 4, Winter.
- (12) Kuester, J. L., Mize, J.H., 1973, Optimization Techniques with Fortran, McGraw-Hill.
- (13) James, N. Siddal, 1971, Analytical Decision-Making in Engineering Design, Prentice-Hall.
- (14) Edward, J. Haug, Jasbir, S. Arora, 1979, Applied Optimal Design, A Wiley-Interscience Publication.