

여유구동 3RRR 병렬로봇의 힘분배 제어에 관한 연구

이상문*, 심호석#, 이재원**

Torque Distribution Control of 3RRR Redundant Parallel Robot

Sang Moon Lee*, Ho Seok Shim# and Jeh Won Lee**

ABSTRACT

In the redundant actuation system which has more actuators than a system's mobility, there are various method to determine actuated torques because those are not determined uniquely. This paper presents a torque distribution method using weighted-pseudoinverse to optimize the maximum torque of various actuated inputs of the redundant system. The various weighting factor of weighted pseudoinverse is studied to reduce maximum actuated torque. This method is experimentally applied to 3RRR parallel robot, which shows that presented method can efficiently reduce the maximum actuated torque.

Key Words : Redundant actuation (여유구동), Torque distribution (토크 분배), Weighting factor (가중치 요소), Minimum norm torque (최소구동력), Weighted pseudoinverse (가중의사역행렬)

기호설명

J^+ = pseudoinverse of matrix J
 J^{W+} = weighted pseudoinverse of matrix J
 F_C = force matrix of end effector
 τ_A = torque matrix of actuated joint

1. 서론

구동 입력 수가 시스템의 자유도보다 큰 경우를 여유 구동 시스템(Redundant Actuated System)이라고 한다.^{1,4} 여유 구동되는 시스템은 주위에서 쉽게 찾아 볼 수 있다. 인체의 팔과 다리는 운동에 반드

시 필요한 근육의 수보다 더 많은 근육을 가지고 있다. 하나의 관절을 움직이기 위하여 여러 개의 근육이 동시에 사용이 된다.¹

여유구동 로봇은 비여유구동로봇과 같은 작업을 수행할 경우 각 구동모터들의 토크는 유일해가 아닌 수많은 경우의 토크로 결정되어질 수 있다.

여유 구동에 관한 기존 연구들을 살펴보면, 이상현^{1,9} 등은 비여유구동 매니플레이터와 여유구동 매니플레이터의 경우에 대하여 End effect에서의 최대하중용량, 최대속도, 최대가속도를 비교했을때 여유구동에 의한 작업성능이 더 향상됨을 보였다. 김성복² 등은 여유 구동을 통한 매니플레이터의 작업 성능 향상을 연구하였고, 이병주³ 등은 자코비안

접수일: 2007년 4월 2일; 게재승인일: 2007년 11월 22일

* 영남대학교 기계공학부 석사과정

교신저자: 영남대학교 기계공학부 박사학위과정

E-mail: hodol@yumail.ac.kr Tel. (053) 810-3568

** 영남대학교 기계공학부 교수

의 특이값들에 기준한 로봇관절의 고장정도를 판단할 수 있는 지수들을 제시하였으며, 박동일^{4,11} 등은 가중의사 역행렬을 이용한 여유구동 시스템의 힘 분배 기법에 관한 연구를 수행하여 실제 5링크 기구에 적용시켰다. S.Kock⁵ 등도 가중의사역행렬을 이용한 힘분배 알고리즘을 연구하였다.

본 논문에서는 로봇 End effect의 위치와 작용력이 동시에 고려되는 3RRR병렬 로봇을 구동하는데 있어서 구동입력의 크기를 최적으로 재결정할 수 있는 힘 분배 기법 중 하나인 가중의사역행렬을 적용하고자 한다. 이를 위해서 우선적으로 가중의사역행렬의 다양한 가중치 변화에 따른 구동토크의 변화량을 동역학 시뮬레이션을 수행하여 최대 토크 변화량을 비교해보고자 한다. 시뮬레이션의 결과로 선정된 가중치를 실제 실험을 통해 적용하여 최종적으로 세 개의 구동토크 중 최대 구동토크를 나머지 두 개의 구동토크로 효율적으로 분배함으로써 최적의 구동토크를 선정하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 각 구동축의 입력 토크 분배 기법

2.1 Joint Error를 이용한 힘 분배

가장 일반적인 여유 구동 시스템의 힘 분배는 기구학적 해석을 통해서이다. 각 모터에 들어가는 토크는 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\tau = \chi \Delta q \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \tau &= [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T && \text{구동조인트의 토크} \\ \Delta q &&& \text{조인트의 deflection} \\ \chi &= \text{diag}[k_1, k_2, \dots, k_n] && \text{각 구동모터의 강성} \end{aligned}$$

각 구동 모터가 동일하기 때문에 모터의 강성도 같으므로 $k_1, k_2, \dots, k_n = k$ 로 표현이 가능하다.

2.2 의사역행렬을 이용한 힘 분배

의사 역행렬을 이용한 힘 분배의 기본적인 이론은 다음과 같다. 자코비안의 특성은 조인트 공간 좌표에서의 속도와 직교 좌표에서의 속도 사이의 관계를 나타내는데 병렬형 매니플레이터는 직렬형 매니플레이터와는 달리 식(2)⁷와 같이 나타난다.

$$\dot{q} = J \dot{x} \quad (2)$$

조인트 공간에서의 토크는 자코비안을 통해서 직교공간의 힘으로 표현이 된다.

$$F_C = J^T \tau_A \quad (3)$$

여기서 J^T 은 로봇의 자세와 운동에 따라서 결정되는 자코비안(Jacobian)행렬이고, τ_A 는 직접 구동토크로 무한개의 해를 가지며 그 일반해는 식 (4)과 같다.

$$\tau_A = (J^T)^+ F_C + (I - (J^T)^+ J^T) Z \quad (4)$$

I 는 단위행렬(Identity matrix)이고, Z 는 임의의 벡터(arbitrary vector)이다. J^+ 는 J 의 의사역행렬(pseudo-inverse matrix)이다.

힘 F_C 는 식 (5)로 표현이 가능하다.

$$F_C = J^T \chi J \Delta x \quad (5)$$

여기서 $J^T \chi J$ 은 K 라는 stiffness matrix로 정의가 된다. 따라서 병렬 로봇의 입력으로 들어가는 구동 토크 τ_A 는 식(6)로 쓸 수가 있다.

$$\tau_A = (J^T)^+ \chi J^T J \Delta x \quad (6)$$

위 식에서 구한 구동토크 τ_A 의 식 (6)는 의사역행렬을 이용한 힘 분배 기법으로 이렇게 구해진 토크는 Minimum Norm Torque가 된다. 위 식을 다른 방식으로 표현을 하면 식(7)과 같다.

$$\tau_A = \chi \Delta q = \chi J \Delta x \quad (7)$$

여기서 구동토크 τ_A 는 구동모터의 강성 χ 와 자코비안 J , End Effect의 미소변화량 Δx 에 의해 결정이 된다.

의사역행렬의 이용한 힘 분배 기법은 에너지 효율을 최소화하기 위한 분배 기법이고 가장 대표적인 힘 분배의 기법이라고 할 수가 있다.

2.3 가중의사역행렬을 이용한 힘 분배

구동 모터 각각의 토크를 좀 더 최적 크기로 제

어하기 위해 가중치 행렬을 도입하여 힘 분배 제어 알고리즘을 이용하였다.

가중치 행렬을 적용한 가중의사역행렬은 식(8)로 주어진다.

$$(J^T)^{W+} = W^{-1} J (J^T W^{-1} J)^{-1} \quad (8)$$

이때 일반해는 식 (9)와 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \tau_{AW} &= (J^T)^{W+} F_C \\ &= W^{-1} J (J^T W^{-1} J)^{-1} F_C \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 가중치행렬 W는 식(10)와 같다.

$$W = \begin{bmatrix} w_{A1} & 0 & 0 \\ 0 & w_{A2} & 0 \\ 0 & 0 & w_{A3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(9)에 식(3)를 대입하여 정리하면 식(11)과 같다.

$$\tau_{AW} = W^{-1} J (J^T W^{-1} J)^{-1} J^T \tau_A \quad (11)$$

결과적으로 의사역행렬의 힘 분배 제어에서 나온 구동토크 τ_A 는 가중치행렬을 거쳐 새로운 구동토크 τ_{AW} 로 힘분배가 이루어지는데 이것은 로봇 End effect의 작용력이 주어지면 식 (4)의 Null공간 해석이 없이 바로 minimum num에 가중치를 적용함으로써 최적의 여유구동 토크를 얻을 수 있게 된다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션의 구성

본 절에서는 기구학 해석프로그램의 하나인 Recurdyn을 이용하여 시스템을 모델링하고 시뮬레이션을 실시하였다. Recurdyn 프로그램은 Matlab의 Simulink를 지원하기 때문에 제어 알고리즘을 Simulink로 프로그래밍하여 Recurdyn과 연동시켰다.

Fig. 1는 Recurdyn에서 모델링된 시스템의 모습이다. 각 링크의 길이는 700mm이고 각 조인트에 걸리는 조인트 마찰력은 0으로 설정하였다. 중력

방향은 구동기의 회전축 방향으로 설정하였다.

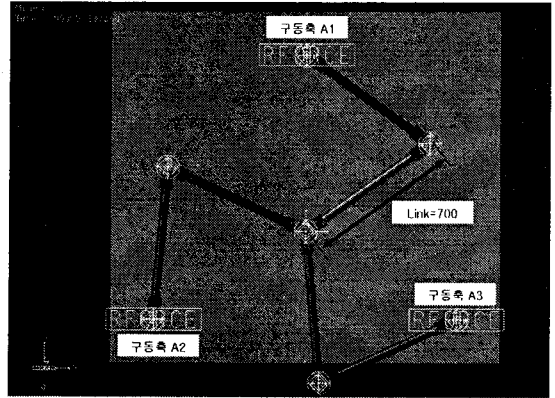


Fig. 1 Redundantly Actuated 3RRR Parallel Robot Modeling

3.2 가중치의 영향 분석

가중치가 구동모터 토크 값에 어떠한 영향을 주는지를 알아보는 것은 중요하다. 가중치 적용에 있어서 어떠한 가중치를 어떻게 적용하느냐에 따라서 구동모터의 토크 값이 줄어드는지 늘어나는지를 먼저 확인할 필요가 있다. 이러한 가중치의 영향력을 분석하기 위해서 3RRR 병렬로봇의 구동입력에 대한 가중치 변수들을 각각 모터에 대한 가중치에 대해서만 바꾸어 가면서 그때의 토크 변화를 관찰해 보았다.

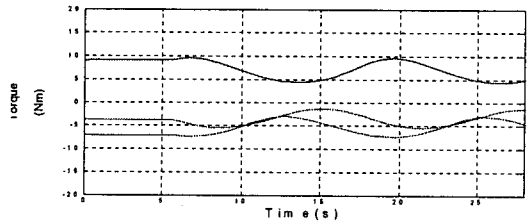


Fig. 2(a) No Weighting

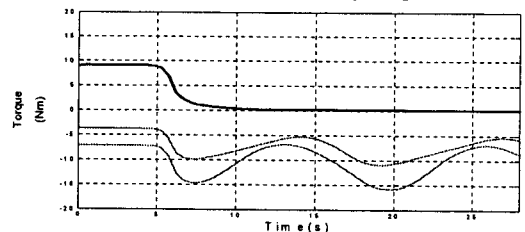


Fig. 2(b) Varying Weighting to Motor A1

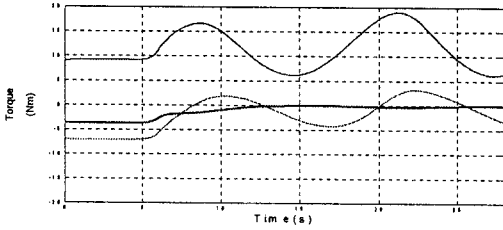


Fig. 2(c) Varying Weighting to Motor A2

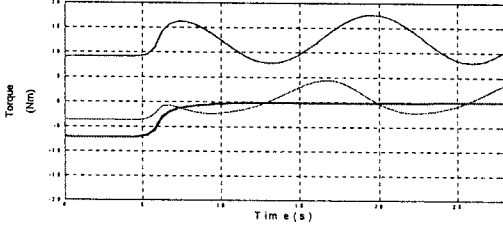


Fig. 2(d) Varying Weighting to Motor A3

위 결과그래프들을 분석해 보면, 대체적으로 가중치가 증가함에 따라서 그에 해당하는 구동 토크 값은 감소하고, 그 외의 토크 값들은 증가하는 경향을 볼 수가 있었다, Fig. 2(a)에서 보는 것과 같이 가중치 w_{A1} 이 증가함에 따라서, 구동축A1의 토크 값의 크기는 점점 감소하고, 결국 토크 값은 0에 수렴함을 볼 수가 있었다. Fig. 2(b), 2(c), 2(d)의 그래프에서도 각각의 가중치가 증가함에 따라서 그에 해당하는 구동 토크 값의 크기는 점점 감소하고, 결국 토크 값은 0에 수렴함을 볼 수가 있었다.

즉 가중치가 증가함에 따라서, 그 가중치에 해당하는 토크 값은 점차적으로 감소하는 경향을 보이고, 결국 0의 값에 수렴하게 된다. 그리고 가중치에 해당하지 않는 토크 값들은 대체적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

그러나 선형적으로 증가하는 가중치의 변화에 해당하는 토크는 비선형적 감소를 보이고 있고, 또 다른 두 토크는 기존보다 오히려 더 큰 폭으로 증가하였다.

이 결과로부터 각각의 가중치들은 독립적으로 결정할 수 있는 값이 아니고, 세 개의 가중치가 동시에 관계지어져야 한다는 결론을 얻을 수가 있었다. 따라서 어떠한 가중치를 선정하였을 때 좀 더 효율적으로 최대 구동 토크 값을 최적으로 분배할 수 있는지 확인하여 선정할 필요가 있다.

3.3 가중치의 선정

첫 번째로 End effect에서 각 구동축까지의 거리를 가중치로 줄 수가 있다. End effect가 움직임에 따라 한 쪽의 길이가 늘어나고, 다른 쪽의 길이는 줄어드는 관계가 지어지는 변수이다.

End effect에서의 좌표 값을 각각 X_c 와 Y_c 라고 한다면 각각의 가중치는 다음 식(12)와 같다.

$$w_{Ai} = \sqrt{(X_c - X_{Ai})^2 + (Y_c - Y_{Ai})^2}, \quad (i=1,2,3) \quad (12)$$

두 번째 가중치 적용 변수로써 각 다리에 해당하는 관성행렬(Inertia Matrix)을 들 수가 있다. 구동축 A1에서부터 End effect까지 각 링크의 질량을 m_1, m_2 라 두면, 여유 구동 3RRR 병렬 로봇의 구동축A1에 해당하는 다리의 관성행렬은 식 (13)과 같다.¹⁰

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}m_1L_1^2 + m_2(L_1^2 + L_1L_2\cos\varphi_1 + \frac{1}{3}L_2^2) & m_2(\frac{1}{2}L_1L_2\cos\varphi_1 + \frac{1}{3}L_2^2) \\ m_2(\frac{1}{2}L_1L_2\cos\varphi_1 + \frac{1}{3}L_2^2) & \frac{1}{3}m_2L_2^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

나머지 링크에 대해서도 같은 방법으로 관성행렬을 구한 뒤 행렬의 norm을 가중치로 선정하였다.

$$w_{Ai} = \|M_{Ai}\|, \quad (i=1,2,3) \quad (14)$$

세 번째로 의사역행렬을 이용하여 구해진 Minimum Norm Torque를 다시 가중치로 이용하는 방법으로 이때 가중치는 식(15)와 같다.

$$w_{Ai} = \tau_{Ai}, \quad (i=1,2,3) \quad (15)$$

여유구동 3RRR 병렬로봇의 시뮬레이션에서 위 세가지 방법의 가중치를 적용한 구동토크의 변화는 Fig. 3과 같다.

각각의 가중치를 비교해 보면(Table 1) 거리를 가중치로 주었을 경우 최대구동토크는 큰 변화가 없는 반면 다른 구동축에 걸리는 토크가 증가되는 경향을 보였고, 링크의 관성행렬을 가중치로 사용한 경우는 최대토크가 다른 구동축으로 분배되기는 하였으나 분배된 크기는 크지 않았음을 알 수 있다. Minimum Norm Torque를 가중치로 사용할 경우 최대토크가 다른 구동축의 토크로 잘 분배되어 가장 좋은 결과를 나타내었다. 따라서 최적의 가중치

로 Minimum Norm Torque를 선정하였다.

Table 1 Torque Comparison of each cases

Weight Type	Maximum (Nm)	Minimum (Nm)
None	23.1	-12.5
Distant	22.5	-20.5
Inertia Matrix	21.27	-14.12
Minimum Norm	17.80	-19.20

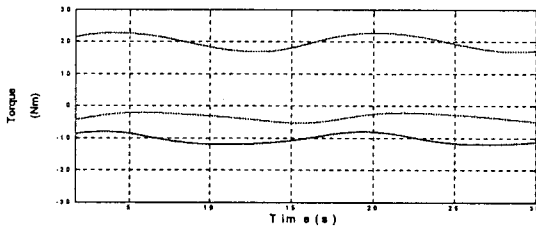


Fig. 3(a) No Weighting

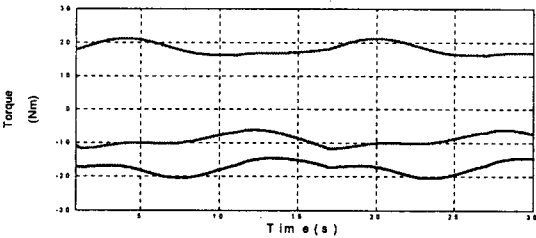


Fig. 3(b) Weighting - Distance of End effect

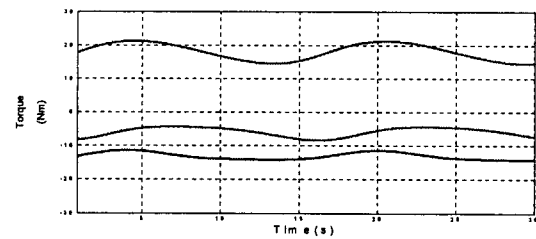


Fig. 3(c) Weighting - Inertia Matrix

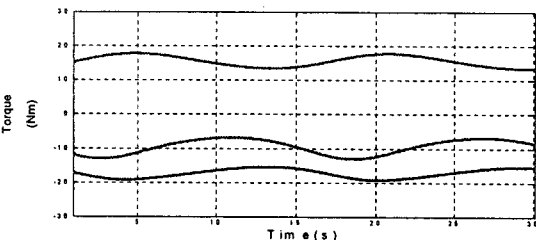


Fig. 3(d) Weighting - Minimum Norm

3.4 가중의사역행렬을 이용한 힘 분배 시뮬레이션

3.3절에서 가장 좋은 결과를 보인 Minimum Norm Torque을 가중치로 사용하여 원궤적을 그리면서 End effect에 외부 힘이 작용하는 경우에 대해 시뮬레이션을 진행해보았다.

궤적은 (120,0)을 중심으로 반지름이 70mm인 원의 궤적을 따르도록 했으며, End effect에서 외부 힘으로 (0, -20) N을 적용했다.

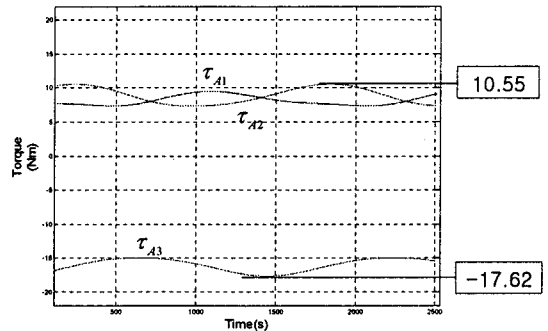


Fig. 4 Pseudo-Inverse of The Jacobian of (120,0) Trajectory-(0,-20) force

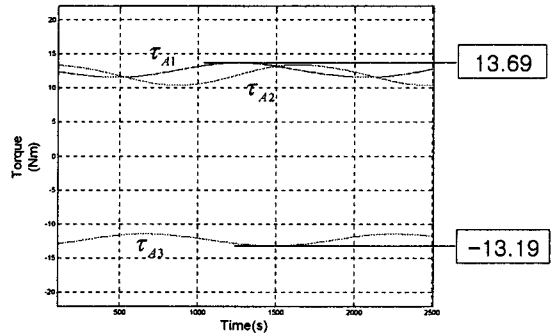


Fig. 5 Weighted Pseudo inverse of The Jacobian of (120,0) Trajectory - (0,-20) force

Fig.4는 단순 의사역행렬을 이용했을 경우의 토크 변화를 나타낸 결과이고 Fig. 5는 가중의사역행렬을 이용했을 경우의 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 나타난 것과 같이 의사역행렬 힘분배 적용시에는 절대값 17.62 [Nm]의 최대토크가 필요한 반면에 Fig.5의 가중의사역행렬을 이용한 힘분배에서는 13.69[Nm]의 최대 토크가 필요하였다.

Table 2 Reduction Ratio of Maximum Torque of Simulation

	Minimum-Norm (Nm)	PseudoInverse (Nm)	Ratio of Reduction (%)
case 1	19.45	15.04	23
case 2	22.42	18.84	16
case 3	17.62	13.69	22

따라서 의사역행렬을 이용한 힘분배시 구동축에 걸리는 최대 토크보다 가중의사역행렬을 이용한 힘 분배시 구동축에 걸리는 최대 토크가 약 16 ~ 23% 감소하는 효과를 보이는 것으로 나타났다.

또한 다른 궤적에 대한 시뮬레이션에서도 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

이는 Minimum Norm Torque을 가중치로 사용했을 때 최대 토크가 다른 토크로 분배됨으로써 전반적으로 각 구동축에 걸리는 토크 부하의 균형을 최적으로 맞추어 주는 효과가 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 실험 결과

3장에서 시뮬레이션을 수행한 결과 구동축에 걸리는 최대토크가 의사역행렬을 이용한 힘 분배보다 Minimum Norm Torque를 가중치로 사용한 가중의사역행렬을 이용한 힘 분배가 약 16 - 23% 정도 감소시키는 효과가 있음을 나타냈다. 본 장에서는 시뮬레이션에서 수행한 것과 같이 의사역행렬을 이용한 힘 분배 제어와 가중의사역행렬을 이용한 힘 분배 제어실험을 수행하여 각각 구동축의 최대 토크 값을 비교해 볼 것이다.

4.1 시스템의 구성

본 실험에서 사용되는 3RRR 병렬 로봇의 전체적인 구성은 Fig. 6과 같다.

3RRR 병렬로봇은 3개의 다리(Leg)로 구성되어 있고, 각 다리에는 2개의 링크 구조로 연결되어 있다. 각 링크는 회전조인트로 연결되어 있으며, 세 다리가 만나는 부분에도 회전조인트로 연결되어 있는 구조로 되어 있다. 링크는 알루미늄(Aluminum)으로 제작되어 링크 무게를 최소화 하였다. 각 링크의 길이는 200mm로 모든 링크의 길이를 동일하게 설계하였다.

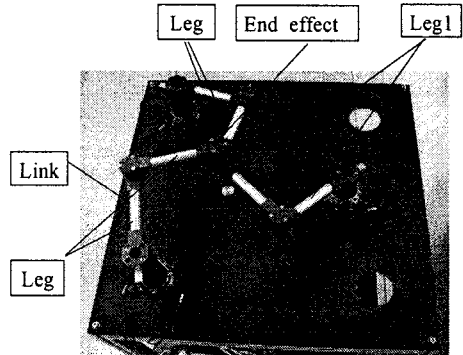
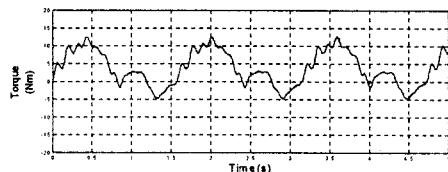


Fig. 6 3RRR Parallel Robot

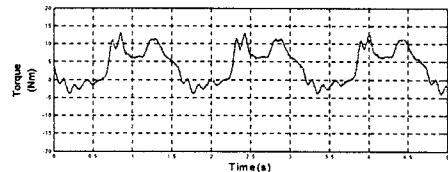
4.2 가중의사역행렬에 의한 힘분배 제어 실험

실험은 몇가지 경우에 대해서 진행이 되었으며 아래는 End effect가 (0,50)을 중심으로 반지름이 50mm인 원의 궤적을 따라가는 상태에서 진행한 결과이다.

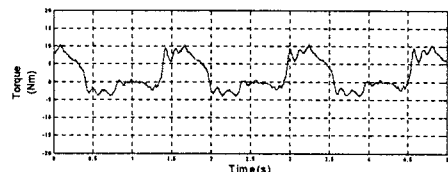
Fig. 7은 의사역행렬을 이용한 힘 분배 실험시 구동토크의 변화량 그래프이고 Fig.8은 Minimum Norm Torque을 가중치로 적용한 가중의사역행렬실험시의 구동토크 변화량 그래프이다.



(a) Torque variation - MotorA1



(b) Torque variation - MotorA2



(c) Torque variation - MotorA3

Fig. 7 Torque Distribution using Pseudo-Inverse of The Jacobian - (0,50) Trajectory

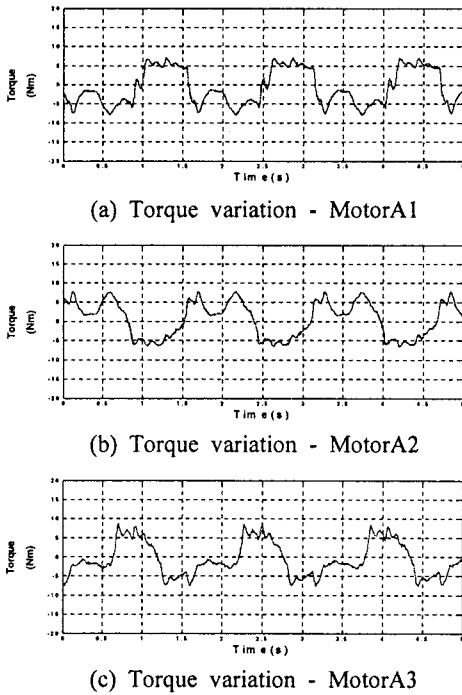


Fig. 8 Torque Distribution using Weighted Pseudo-Inverse of The Jacobian - (0,50) Trajectory

위 실험 결과를 정리하면 Table 3 과 같다.

Table 3 Max-min Torque of Actuated Joint

(단위: Nm)		Motor A1	Motor A2	Motor A3
의사역행렬	max	12.69	12.83	10.47
	min	-4.89	-4.05	-3.96
가중의사역행렬	max	7.07	7.84	8.79
	min	-7.91	-6.44	-7.47

의사역행렬을 이용한 힘 분배 제어를 적용시켰을 경우 10 - 13 [Nm] 크기의 토크가 걸리는 반면 가중의사역행렬을 이용한 힘 분배의 제어일 경우 6.5 - 9 [Nm] 크기의 토크가 최대토크가 약 25 - 33 % 가량 감소 효과를 얻어 낼 수 있음을 실험을 통해 알 수가 있었다.

5. 결론

여유 구동 시스템의 경우는 구동입력의 수가 시

스템 자유도보다 많기 때문에 힘 분배가 필요하게 된다. 본 논문에서는 가중의사역행렬을 통하여 여유 구동 3RRR 병렬 로봇의 각 구동모터들의 입력을 결정해 보고자 하였다.

가중의사역행렬의 사용에서 가중치의 영향을 분석하여 구동입력과 가중치와의 관계를 살펴보았다.

가중치를 구동축에서 End effect까지의 거리, 각 링크의 관성행렬, Minimum Norm Torque로 선정하여 시뮬레이션으로 비교해보았으며 Minimum Norm Torque를 가중치로 사용했을때 가장 좋은 결과를 나타내었다. 따라서 구동입력의 최대값을 줄이기 위한 방법으로 Minimum Norm Torque를 가중치로 선정하였다. 이 결과 구동입력 중 최대토크를 다른 토크로 가장 효율적으로 분배할 수 있었으며 따라서 전체 시스템의 최대 토크를 감소시켜주는 효과를 얻을 수가 있었다.

이것은 한 구동기에 작용하는 최대토크를 다른 구동기로 분배함으로써 안정적인 구동이 가능하며 또한 구동 모터 용량을 25 - 36% 정도 작은 모터를 사용할 수 있기때문에 시스템의 경제성과 소형화에도 기여 할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2003학년도 영남대학교 학술연구조성비에 의한 것임.

참고문헌

1. Lee, S. H., Yi, B. J. and Kwak, Y. K., "Performance Analysis and Optimal Actuator Sizing for Anthropomorphic Robot Modules with Redundant Actuation," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 1, pp. 181-192, 1995.
2. Kim, S. B., "Operational quality analysis of parallel manipulators with actuation redundancy," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2651-2657, 1997.
3. Yi, B. J., Kim, W. K. and Kim, D. K., "Analysis for Fault Tolerant Capabilities of Robots with Kinematic and Force Redundancies," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.

- 19, No. 11, pp. 2927-2938, 1995.
4. Park, D. I., Lee, S. H. and Kim, S. H., "Torque distribution using a weighted pseudoinverse in a redundantly actuated mechanism," VSP and Robotics Society of Japan, Vol. 17, No. 8, pp. 807-820, 2003.
 5. Kock, S. and Schumacher, W., "A Parallel x-y Manipulator with Actuation Redundancy for High-Speed and Active-stiffness Application," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2295-2300, 1998.
 6. Park, J. H., Chung, W. K. and Youm, Y. G., "Weighted Decomposition of Kinematics and Dynamics of Kinematically Redundant Manipulators," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 480-486, 1996.
 7. Tsai, L. W., "Robot Analysis - The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators," John Wiley & Sons INC, pp. 223-231, 1999.
 8. Kim, T. J., Yi, B. J. and Suh, H., "Load Distribution Algorithm and Experimentation for a Redundantly Actuated, Singularity-free 3-DOF Parallel Haptic Device," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and system, Vol. 3, pp. 2899-2904, 2004.
 9. Lee, S. H., "Control of active stiffness and impact disturbance by redundantly actuated mechanism," Ph. D. Thesis, KAIST, 2001.
 10. Ropponen, T. and Nakamura, Y., "Singularity-free parameterization and performance analysis of actuation redundancy," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 806-811, 1990.
 11. Kim, J. S., Kim, W. K. and Cho, W., "Study on the Precision Characteristics of a Planar 3 Degrees-of-Freedom Parallel Mechanism," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 781-786, 1996.
 12. Ryu, G. H. and Cho, B. K., "A Study on the Kinematic Analysis of a 6-DOF Parallel Robot Manipulator," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 149-156, 1995.
 13. Jeong, J. I. and Kim, J. W., "Kinematic Calibration Method for Redundantly Actuated Parallel Mechanisms," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 355-360, 2002.