

고장에 대한 내성을 갖는 로봇 매니플레이터 시스템의 개발에 관한 최근연구동향

신규식, 이병주*, 김희국**

삼성데이터시스템, * 한양대학교 제어계측공학과, * 고려대학교 제어계측공학과

1. 서 론

현대의 고도화되는 CIM(Computer Integrated Manufacturing)등과 같은 생산 시스템에서의 생산 공정의 자동화는 필수 불가결하다. 이러한 추세에 발 맞추어 로봇 사용의 빈도는 더욱 증가되어 가리라 기대되며, 특별히 원자로, 우주 공간, 그리고 바닷속 등과 같이 인간이 작업하기 어려운 상황에서는 로봇의 사용이 절대적이라고 하겠다. 그러나, 이와 같이 열악한 환경들 속에서 사용되는 로봇은 고장이 발생한 경우 쉽게 수리할 수 없는 난점이 있다. 또한 생산 자동화 라인에서 사용되는 로봇 시스템에 고장이 발생하였을 경우, 모든 관련된 생산 라인의 중단으로 말미암아 생산 계획의 차질이 발생되며 이로 인해 큰 손실이 야기된다. 일반적으로 로봇 시스템의 고장을 방지하는 위해서는 고 품질의 기계요소들을 사용하여 신뢰성을 향상시키거나 빈번한 점검을 통하여 시스템의 상태를 조사함으로써 사전에 필요한 조치를 취하는 방법들이 사용되고 있다. 그러나, 이러한 방법들은 전혀 예측 못한 고장에 대처할 수 없는 단점을 지니고 있으므로, 실제로 고장이 발생한 상황에서도 로봇 시스템의 신뢰성을 더욱 향상시킬 수 있는 고장에 대한 내성(fault tolerance)을 지닌 로봇의 개발에 관한 연구가 반드시 필요하며 국외에서는 이러한 연구분야에 대한 많은 연구가 NASA, 미국 오스틴 소재 텍사스 주립대 등을 중심으로 진행되어 오고 있다[1-7].

그러므로, 본 논문에서는 이러한 고장에 대한 내성을 갖는 로봇의 개발에 관한 최근연구동향과 연구방법 등에 관하여 기술하고자 한다. 2절과 3절에서는 우선, 일반적인 고장에 대한 내성을 갖는 시스템에서 사용되는 기본적인 용어들의 정의, 그리고 이러한 시스템의 구현에 관련된 접근방식

들에 관하여 기술한다. 4절에서는 고장에 대한 내성을 갖는 로봇에 관련된 제반 연구동향에 관하여 기술한 후, 5절과 6절에서는 각각 로봇 매니플레이터의 경우에 있어서 고장에 대한 내성을 갖기 위한 네 가지 단계의 구조(architecture)와 고장에 대한 내성을 나타내는 성능지수들에 관하여 소개한다. 7절과 8절에서는 각각 로봇의 관절부분에서의 고장(즉, 관절 센서나 액추에이터의 고장)이 발생하는 경우에 이에 대한 감지와 이로부터의 회복 등과 같은 고장에 대한 내성을 갖기 위한 접근방법에 관한 몇 가지 방식에 관하여 기술한다.

2. 고장에 대한 내성(Fault Tolerance)에 대한 정의

그러면, 간략하게 고장에 대한 내성을 갖는 시스템에서 사용되는 몇 가지의 용어들에 대한 정의에 관하여 기술한다 [3]. 고장(Fault)이라는 단어의 의미는 시스템의 하드웨어나, 소프트웨어에 문제를 발생시키는 결함과 같은 물리적인 오류를 나타낸다. 고장은 작동상의 고장(Operational Fault)과 설계상의 고장(design fault)의 두 가지로 분류될 수 있으며 작동상의 고장은 시스템 또는 시스템 요소들의 불완전한 제작, 마모 등으로 인한 요소들의 결함이나 작업장의 온도변화, 작동자의 조작실수, 또는 충돌 등과 같은 외부적인 요인들로 인한 고장을 의미하며, 설계상의 고장은 하드웨어나 소프트웨어의 잘못된 설계사양으로 발생하는 고장을 의미한다. 그러므로, 고장에 대한 내성은 이러한 여러 가지 형태의 고장이 발생하는 경우에 시스템이 원래의 성능을 어느 정도 유지할 수 있는가에 대한 특성을 나타낸다.

이러한 고장에 대한 내성과 관련되어 활용되는 몇 가지의

척도들로는 신뢰성(reliability), 유효성(availability), 생존성(survivability), 안정성(safety), 성능유지성(performance), 임무실행시간(mission time), 유지성(maintainability), 진단성(diagnosability), 보호범위(coverage) 등이 있으며 이들의 의미를 간략하게 기술하면 각각 다음과 같다.

- 가) 신뢰성: 신뢰성이란 초기에(t_0) 완전히 작동중인 시스템이 설정된 기간동안 ($[t_0, t]$) 주어진 기능을 얼마나 수행할 수 있는 가를 나타내는 조건확률로 정의된다.
- 나) 유효성: 유효성이란 어떤 순간(t)에 시스템이 작동을 하며 만족할 만한 성능을 제공하는가를 나타내는 확률로 정의된다.
- 다) 생존성: 생존성이란 사전에 정의된 고장들이나 이들 중 몇 가지의 고장이 발생된 경우에 주어진 작업을 수행할 수 있는 확률로 정의된다.
- 라) 안전성: 안전성이란 고장이 발생하는 경우에도 작업자의 안전은 물론 다른 시스템의 작동을 중단시키지 않으며 지속적으로 주어진 작업을 수행할 수 있는 확률로 정의된다.
- 마) 성능유지성: 성능유지성이란 고장이 발생된 경우 어느 정도까지 주어진 작업을 수행할 수 있는 확률로 정의된다.
- 바) 임무수행시간: 임무수행시간은 시스템의 신뢰성이 이미 설정되어진 수준이하로 낮아지는 시간으로 정의된다.
- 사) 유지성: 유지성이란 시스템에 고장이 발생된 경우에 설정된 시간(t)내에 성능을 회복할 수 있는 확률로서 정의된다.
- 아) 진단성: 진단성이란 시스템에 고장이 발생된 요소를 찾아낼 수 있는 기능의 척도를 의미한다.
- 자) 보호범위: 보호범위란 고장회복범위와 고장인식범위의 두 가지가 있는데 전자는 고장이 발생되었을 경우 시스템이 성공적으로 원래의 기능을 회복할 수 있는 확률로서 정의되며 후자는 시스템의 고장을 인식할 수 있는 기능의 척도를 의미한다.

한편, 감퇴(failure)는 오차로 인하여 시스템이 주어진 기능을 수행할 수 없는 능력감퇴의 상태를 나타내며 로봇의 경우에 있어서 예를 들면, 한 액츄에이터의 제어 불능상태로 인하여 주어진 작업을 수행할 수 없는 기능감퇴의 상태를 의미한다. 이상과 같은 고장에 대한 내성과 관련되어 활용되는 척도 중에서 신뢰성은 자주 활용되는 척도중의 하나이며 본 절에서는 중점적으로 이에 관하여 기술한다.

2.1 신뢰성 함수

먼저 감퇴시간분포(failure time distribution) $F(x)$ 는 무작위변수(random variable) X 의 확률분포함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$F(x) = P[X \leq x] \quad (1)$$

그리고 확률밀도함수(probability density function) $f(x)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2)$$

여기서 신뢰성함수(reliability function)는

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(x) dx \quad (3)$$

로 정의된다. 한편, 감퇴율(failure rate)는

$$z(t) = \frac{F'(t)}{R(t)} \quad (4)$$

로 정의되며 여기서 “ ‘ ” 은 시간에 대한 미분을 나타낸다. 일반적으로 감퇴율은 시간의 함수로서 Fig. 1은 Bathtub Curve라고 불리는 감퇴율 특성을 나타내는 그림이다. 그림에서 유아기(infant mortality phase), 유용기(useful life phase), 마모기(wear-out phase) 등의 세 부분으로 나누어지는 것을 알 수 있다. 한편, 감퇴밀도($f(t)$)와 감퇴율함수($z(t)$)사이의 관계식은

$$f(t) = z(t)e^{-\int_0^t z(x) dx} \quad (5)$$

와 같이 유도된다.

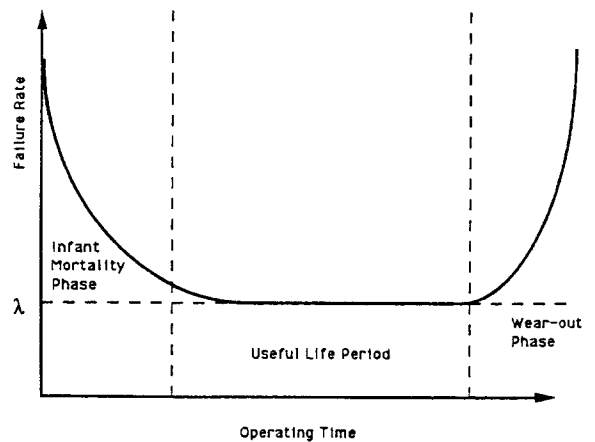


Figure 1. Bathtub Failure Rate Curve.

신뢰성함수중의 예로서 전자부품요소들의 경우에는 감퇴율이 고정된 값 λ 를 갖는다고 가정되는데 이 경우 신뢰성함수는

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (6)$$

로 표현이 되며 이러한 관계식은 지수감퇴의 법칙(exponential failure law)으로 알려져 있다. 기계적 요소들의 고장의

경우 시간이 경과함에 따라 감퇴율이 증가하는 경향을 나타내며 이러한 경우 감퇴율은

$$z(t) = e^t \quad (7)$$

로서 표현된다. 소프트웨어의 설계결함은 소프트웨어를 활용함에 따라 결함이 발견되고 수정될 수 있으며 이와 같이 시간이 경과함에 따라 시스템의 신뢰성은 증가하게 되고 감퇴율은 감소하게 된다. 이러한 시간에 따라 변하는 감퇴율의 함수로서 Weibull distribution과 관련된 감퇴율은

$$z(t) = \alpha \lambda (t)^{\alpha-1} \quad (8)$$

로 표현되며, 여기서 α 와 λ 는 형태(shape)와 척도(scale)를 나타내는 인자로서 고정된 상수이다. 이에 해당하는 신뢰성함수는

$$R(t) = e^{-(\lambda t)^\alpha} \quad (9)$$

로 주어진다. 이 밖에도 normal distribution, gamma distribution, Bayesian distribution, 그리고 그 밖의 distribution들이 활용될 수 있다.

한편, 평균감퇴시간(mean time to failure : MTTF)과 평균수리시간(mean time to repair : MTTR), 평균감퇴사이시간(mean time between failure : MTBF)등이 시스템의 감퇴와 수리에 관한 특성을 나타내기 위하여 사용되는데 이들은 각각 다음과 같이 정의된다. 평균감퇴시간은 작동을 시작한 시스템에 최초로 감퇴가 발생되기까지에 걸리는 예상시간(expected time)을 나타내며

$$E(t) = MTTF = \int_0^\infty t f(t) dt \quad (10)$$

로 표현된다. 이 식에서 $f(t)$ 는 감퇴밀도함수(failure density function)를 나타낸다. 예를 들어 고정된 감퇴율과 지수 감퇴율을 따르는 전자부품과 같은 시스템의 경우에 있어 감퇴밀도함수는

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (11)$$

로 표현되며

$$MTTF = \int_0^\infty t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (12)$$

임을 알 수 있다. 한편, 평균수리시간은 시스템의 수리를 하는데 걸리는 예상시간을 의미하며 일반적으로 실험적으로 측정이 되며 해석적인 모델은 매우 어렵다. 그럼에도 불구하고 주어진 주기동안에 수리할 수 있는 평균수로 정의되는 수리율(μ)과 밀접한 관계가 있으며 평균감퇴시간과 유사하게 다음과 같이 표현된다.

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (13)$$

평균감퇴사이시간은 수리된 시스템의 감퇴사이의 평균시

간을 나타내며 평균감퇴시간과 평균수리시간과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (14)$$

위 식에서 평균수리시간은 평균감퇴사이시간과 평균감퇴시간에 비하여 상대적으로 매우 적으므로 무시할 수 있다. 이 밖에도 임의의 주어진 순간에 시스템이 작동할 것인가에 대한 확률을 나타내는 유효성이 수리가능한 시스템에 대하여 매우 유용한 척도로서 활용될 수 있는데 예를 들면, 시스템이 작동하는 시간비율로 정의되는 정상상태유효성(steady-state availability)은 다음과 같이 얻어진다.

$$A_{ss} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (15)$$

특히, 지수적인 분포(exponential distribution)의 경우 정상상태유효성은

$$A_{ss} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (16)$$

로 표현된다.

2.2 신뢰성 모델링

시스템 각 요소들의 신뢰성이 확인되었을 경우에 전체 시스템의 신뢰성에 대한 확인이 수행되어야 한다. 복잡한 시스템의 경우에는 실험적인 방법에 의존하는 것은 시간적으로나, 경제적인 측면에서 매우 불합리하므로, 주로 해석적인 방법이나 시뮬레이션에 의존하여 수행된다. 이러한 신뢰성 해석에 활용되는 모델링 기법으로는 결합모델(combinatorial model), 고장 계통수(fault tree), Markov 모델, Petri nets[8,9] 등이 있다.

결합모델의 경우는 시스템의 부시스템을 간단한 직렬이나 병렬의 연관 구조를 가지는 경우에 적용될 수 있는 방법으로 각각 직렬 시스템과 병렬 시스템으로 나누어진다. 직렬 시스템 전체의 신뢰성은

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (17)$$

로 얻어지며 여기서 R_i 는 i 번째 요소의 신뢰성을 나타낸다. 한편, 병렬 시스템 전체의 신뢰성은

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (18)$$

로 얻어진다.

일반적인 실제 시스템의 경우 그 기능과 구조적 측면에서 시스템의 각 요소들의 상호연관관계를 계통수(tree)로서 표현될 수 있는데 이러한 계통수에 Boolean operators를 이용하여 논리적으로 시스템 전체의 고장에 대한 신뢰성을 산출할 수 있으며 이 경우 이러한 계통수를 고장 계통수라고 한다[10]. 한편, 위와 같은 결합모델이나 고장계통수를 산출하기에 너무 복잡한 시스템의 경우, 구체적으로, 고장이 있

거나 없는 요소를 내포하고 있는 시스템의 현재상태는 바로 다음 순간의 시스템의 상태를 결정할 수 있기 때문에 Markov model를 사용하여 전체 시스템의 신뢰성을 산출할 수 있다. 이 밖에 asynchronous event-driven 동작, deadlock, conflict, concurrency 등의 특성이 고려되어야 하는 상세한 고장모델을 위해서는 Petri net 기법을 활용하는데 Extended Stochastic Petri Nets(ESPN)으로 시스템의 고장 허용범위와 기능저하에 대한 해석에 활용된 사례[11]와 Generalized Stochastic Petri Nets(GSPN)으로 시스템의 신뢰성, 유지성과 고장진단에 적용된 사례들을 문헌에서 찾아볼 수 있다[12].

한편, 시스템의 구조 및 특성이 복잡해짐에 따라서 해석적인 방법의 활용이 어려워지므로 시뮬레이션에 의존하여 시스템의 신뢰성을 조사하는데 주로 Monte Carlo 시뮬레이션방법이 사용되며 이러한 경우 구체적으로 시스템의 출력변수와 독립변수 또는 인자들 사이의 함수관계를 나타내지 않기 때문에 민감도 해석에 많은 어려움이 있으며 이로 인하여 더 많은 시뮬레이션 시간이 요구되는 단점이 있다. 현재까지 시스템의 신뢰성, 유효성과 유지성 등을 평가하기 위한 많은 수의 소프트웨어가 사용되고 있으며 이러한 소프트웨어들에 대한 조사와 이들 각각의 장단점들에 대한 문헌[13]에서 찾아볼 수 있다.

3 고장에 대한 내성을 갖는 시스템의 구현을 위한 접근방법

Fault tolerance의 접근방법으로서는 일반적으로 다음과 같은 네 가지 단계를 거쳐서 수행된다:

- 가) 고장감지(fault detection),
- 나) 고장범위의 파악(fault confinement),
- 다) 고장으로부터의 회복(recovery),
- 라) 고장치유(fault treatment).

이러한 네 가지 단계를 성공적으로 수행하기 위해서는 시스템 내에 여분의 요소(redundant elements)들이 요구되며 다음과 같은 다섯 가지의 유형이 있다:

- 가) 하드웨어에서의 여분(hardware redundancy),
- 나) 소프트웨어에서의 여분(software redundancy),
- 다) 해석적인 여분(analytical redundancy),
- 라) 정보의 여분(information redundancy),
- 마) 시간의 여분(time redundancy).

하드웨어에서의 여분의 경우 정적(static), 동적(dynamic) 그리고 혼합적(hybrid) 여분 기법으로 분류될 수 있다. 정적 여분의 기법은 고장난 요소의 효과를 단순히 제외(masking)하는 방법으로서 세 개의 동일한 복제된 요소를 가지는 시스템의 경우는 triple modular redundancy(TMR)이라고 하며 N 개의 동일한 복제된 요소를 가지는

시스템의 경우는 N -modular redundancy(NMR)라고 한다. 동적 여분기법은 고장감지, 고장위치, 형상변형(reconfiguration)을 활용하여 고장에 대한 내성을 얻는 방법으로 일반적으로 두개의 모듈이 직렬로(tandem) 작동하며 고장이 감지가 되면 고장이 발생된 모듈은 제외되고 나머지 온전한 모듈이 지속적인 작업을 수행하도록 하는 pair-and-spare 기법과 두 개의 모듈중 한 개의 모듈이 작동하며 고장이 발생한 경우 나머지 다른 모듈로 대체되는 방법이 있으나, 후자의 경우는 작업의 순간적인 중단이 발생하는 단점이 있다.

한편, 소프트웨어 여분이란 여분의 프로그램을 가리키며 이러한 프로그램은 고장이 발생하는 경우에 대비하여 모든 가능한 상황에 대한 코드를 내포하고 있다. 해석적 여분이란 시스템의 모델을 이용하여 실제 시스템과의 거동을 비교함으로써 고장을 인식할 수 있는 소프트웨어 형태의 여분을 의미한다. 그리고 정보의 여분이란 고장인식이나 고장에 대한 내성에 활용될 여분의 정보를 의미하며 간단한 형태로는 다중의 데이터 사본이나 오차인식과 오차수정코드 등과 같은 여분의 정보가 있다. 시간의 여분이란 시스템의 작동 중에 시간적인 여유가 있는 경우에 있어 반복적인 행동을 수행하는 것을 의미하며 예를 들면, 컴퓨터를 활용한 수치계산 등에서 동일한 계산을 몇 차례 반복하여 정확한 결과를 얻어내는 데 활용된다. 그러면, 본 절에서는 이상과 같은 여러 유형의 여분요소를 활용하는 고장에 대한 내성을 갖는 시스템의 구현에 관련된 네 가지 단계 중 고장감지와 고장 회복단계에 관하여 간략하게 기술한다.

3.1 고장감지

고장감지는 고장의 감지, 고장부분의 격리, 고장의 규명되는 단계로 구성되며 고장감지기능을 가지는 시스템들을 총칭하여 고장감지 및 규명시스템(Failure Detection and Identification system : FDI system)이라 부른다. 고장감지방법으로는 모델을 고려하지 않은 방법(model-free techniques)과 모델에 근거한 방법이 있으며 모델을 고려하지 않은 방법으로는 여분의 요소를 활용하고 이중 중간값을 취하는 중간값 선정법(mid-value select method)[14]이나, 고장이 감지된 요소를 시스템에서 자동으로 제외시키는 자정여분법(self-purging redundancy)[15]과 같은 여분기초 감지법(redundancy-based detection)과 요소들의 한계를 점검함으로써 고장을 감지하는 한계점검법(limit checking), 진동감시(vibration monitoring)[16]와 같은 상태감시법(condition monitoring), 모터전류 신호해석 등과 같은 신호해석법[17], Expert system에 근거한 진단법[18-21], 인공신경망을 이용한 방법[22, 23] 등이 있다. 모델에 근거한 방법으로는 parity relation[24, 25], reachable measurement intervals[26], state estimation-based methods[27-

29] 등과 같은 residual generation에 의한 방법이 있으며 이러한 방법에서 고장결정을 하는 데는 direct parallel testing와 multivariate testing[30], sequential probability ratio test[30, 31], generalized likelihood test[32-34], Bayesian methods[35] 등의 방법이 사용된다.

3.2 고장회복

고장에 대한 감지가 되면 FDI system이 적절한 고장으로 부터의 회복을 위한 응답을 수행되어야 하는데 이러한 고장 회복단계는 시스템과 작업환경사이에서 발생하는 특별한 고장의 효과나 임무와 작업의 중요성에 따라 변화가 다양하다. 로봇 매니퓰레이터의 센서나 액츄에이터에 고장이 발생한 경우에 대한 각각의 고장회복단계에 관해서 8절에서 기술한다.

이밖에도 FDI 시스템의 설계에 있어서 요구되는 특성은 모델링 오차에 대한 최소한의 민감성(견인성: robustness)과 고장효과에 대한 최대의 민감도(sensitivity)이며 고장사이의 식별용이성(isolability) 등이 있다[36-38].

4. 고장에 대한 내성을 갖는 로봇 매니퓰레이터 시스템의 연구동향

실제 시스템에 있어서의 고장에 대한 내성(Fault Tolerance)이라는 개념의 적용은 1950년대 최초의 전자 컴퓨터의 설계에서 유래되었다[39]. 이러한 전자 컴퓨터 분야에서는 가장 기본적인 요소인 IC Chip 설계 뿐 만 아니라 IC Chip을 사용하는 액츄에이터의 구동 회로에서 고장이 발생한 경우에도 시스템을 정상적으로 운영할 수 있도록 설계하는 많은 연구가 진행되어 왔다. 우주 항공 분야에서도 이러한 Fault Tolerance의 개념이 미사일의 구동 시스템 설계에서 적용되어 왔다. 즉, 고장을 대비하여 이중 또는 삼중 액츄에이터로 구성된 구동시스템이 사용되었다. 이 밖의 다른 많은 분야들에서도 Fault Tolerance의 개념이 도입되어 왔다. 한편, 로봇 시스템에 있어서는 여러 가지 설계지수들을 만족시키기 위한 최적설계[40-43], 그리고 여유 자유도 또는 여유 구동을 도입하여 보다 로봇의 성능을 증진시킬 수 있도록 하는 연구가 진행되어 오고 있으나, 현재까지도 로봇 시스템에 대한 Fault Tolerance 개념의 적용에 관계된 연구[1-7, 44-54]는 매우 초보적인 단계에 머물러 있는 상태이다.

현존하는 유일한 Space 로봇(RMS)의 설계에서는 Fault Tolerance가 전혀 고려되지 않음으로 해서 우주공간에서 모터, 구동시스템, 관절, 그리고 다양한 센서들의 고장을 경험해 왔다[1, 2]. 또한 구 소련 Chernobyl[47] 원자력 발전소에서 핵 방사선 유출시 청소 목적으로 로봇들이 투입되었지만 고장으로 인해 작업을 성공적으로 수행하지 못한 사실

들을 주목해 볼 필요가 있다. 그러므로, 최근에 Fault Tolerance를 고려한 로봇 설계의 개념은 실제로 NASA/JSC를 중심으로 Space 분야와 DOE를 중심으로 Nuclear Reactor의 분야에서 중요한 연구 과제로 부각되고 있다.

현재까지 진행된 로봇의 Fault Tolerance와 관련된 연구들은 다음과 같다. Pradeel[48]는 Rhino XR-2 로봇에서의 고장에 기인한 성능 저하에 대한 분석을 하였고, 원래의 로봇 구조에 추가적인 자유도를 부여함으로써 고장에 견딜 수 있는 방법론에 대한 기초적인 조사를 하였다. 대부분의 경우에 있어서 베이스 관절에 고장이 일어날 경우, 활동 구간이 현저하게 감소함을 알 수 있었다. Ting, et al.[5, 6]은 로봇 시스템의 고장난 관절이 나머지 관절들로 보상될 수 있다는 가정 하에서 여유 구동/여유 자유도의 로봇에서 임의의 관절에 고장이 발생한 경우 주어진 작업경로를 이탈하지 않고 지속적으로 작업을 수행할 수 있는 Fault Recovery 알고리즘을 제안하였다. Tosunoglu[7]는 로봇의 모듈러식(modular) 설계방식과 Fault Tolerant 설계 방식간의 상반되는 성질에 대하여 논하였으며 Fault Tolerance가 Modular Mechanical Architecture에 도움이 된다는 것을 주장하였다. Sreevijayan[3]는 Fault Tolerance와 관련된 최근까지의 모든 연구에 대한 전반적인 조사 및 분석을 수행하였다. Maciejewsky[49]는 여유 자유도 로봇의 자코비안으로 가정되는 임의의 행렬에 대해서 Dexterity measure를 적용하여 최적의 Fault-Tolerant 형상에 대한 분석을 시도하였다. Lewis와 Maciejewsky[50]는 여유 자유도 매니퓰레이터의 임의의 관절에 고장이 발생한 경우에, 최소 특이값(minimum singular value)을 Fault Tolerant의 척도를 나타내는 지수(index)로 제시하였고, Maciejewsky[51]는 이 지수에 근거하여 영공간(null space)에서의 운동을 최대화할 수 있는 작업 지점에 대한 해석을 수행하였다. Paredis, et al.[52, 53]는 Fault Tolerant Workspace (FTW)에 대한 재 정의 및 FTW를 최대화 하는 최적 설계를 수행하였다. Sreevijayan[3]은 매니퓰레이터의 Fault Tolerance 연구에 대한 전반적인 조사를 수행하였다. 국내에서도 최근에 병렬형 여유 구동을 지닌 구형 3 자유도[44] 및 6 자유도[42] 병렬 메카니즘에서의 Fault Tolerance에 대한 분석과, 평면형/공간형 여유 자유도/구동 매니퓰레이터에서 임의의 관절에 고장이 발생하였을 경우에 FTW 및 입출력간의 속도/힘 전달에 관한 해석을 통하여 최적의 로봇 구조를 찾아내는 연구가 진행되고 있다[44-46].

가장 이상적인 Fault Tolerant 로봇이란 시스템의 액츄에이터, 센서, 컨트롤러, 그 밖의 로봇 시스템의 구성 요소들에서 고장이 발생하는 경우에도 정상적으로 운영될 수 있는 시스템을 의미한다. 실제로, Fault Tolerance의 개념이 도입된 로봇 시스템을 제작하기 위해서는 다음과 같은 많은

사항들이 고려되어야 한다: 즉, 고장이 일어난 상황에서 원하는 작업을 지속적으로 수행할 수 있는 로봇의 구조, 액추에이터의 형태, 센서의 선택, 제어 방식의 설정 등이 있으며, 그 밖의 많은 관련된 분야에 대한 고찰이 필요하다.

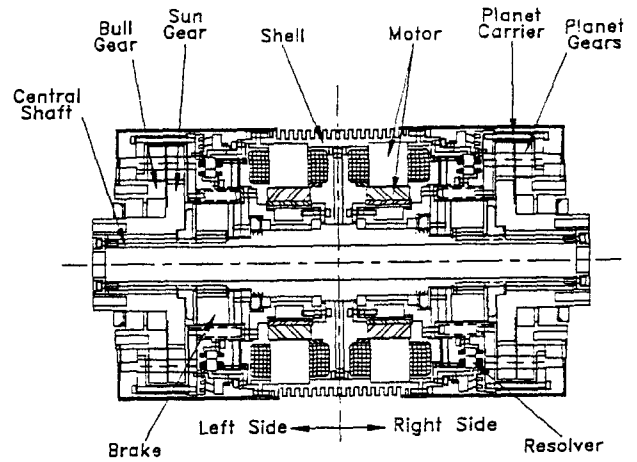
5. 네 단계의 고장에 대한 내성을 갖는 로봇 매니플레이터의 구조

실제적으로 이상적인 Fault Tolerance를 성취하기 위해서는 우선적으로 로봇의 기계적인 구조에 대한 측면이 중요시 되는데 Sreevijayan[2]은 네 단계의 Mechanical Fault Tolerant Architecture를 제시하였다. 그 첫번째 단계로는 액추에이터 단계에서의 Fault Tolerance인데 이중 액추에이터(dual prime mover)의 개념으로 구현된다. 액추에이터의 한쪽이 고장난 상황하에서도 나머지 반쪽으로 시스템을 운영하는 방식이다. 두번째 단계로는 병렬형 모듈에서의 여유 구동으로 인한 Fault Tolerance의 도입이다. 병렬형 메카니즘의 일부 액추에이터에 고장이 발생한 경우, 그 관절을 수동 관절(passive joint)에서와 같이 풀어놓은 상태에서 나머지 액추에이터로 시스템을 운영한다. 이것은 관절을 잠금으로 인하여 시스템이 구조물로 되는 현상을 방지하기 위해서이다. 세번째 단계는 여러 개의 직렬 그리고 병렬 모듈들의 조합으로 구성된 혼합형 직렬 체인의 관절 공간에서의 여유 자유도에 의한 Fault Tolerance이다. 일부 액추에이터에 고장이 발생한 경우 그 관절을 잠금으로 인하여 상단 부분이 임의로 움직임을 방지하여 주며 나머지 액추에이터들로 시스템을 운영한다. 네번째 단계는 Dual Arms 또는 Multiple Arms와 같은 시스템에서의 Fault Tolerance로서 이 시스템은 많은 여유 구동 그리고 여유 자유도에 의한 Fault Tolerance를 지닌다. 이상에서 살펴보았듯이 각 단계는 그 상위 단계의 Fault Tolerance 영역에 속해 있으며 또한 하위 단계를 포함하고 있음을 알 수 있다.

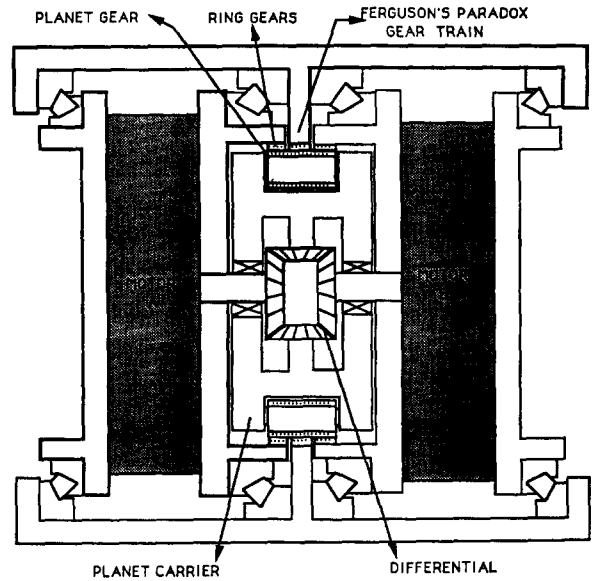
5.1 첫번째 단계 : 이중 액추에이터

첫번째 단계에서는 액추에이터 레벨에서의 Fault Tolerance를 고려한다. 이중 액추에이터의 개념은 두 개의 액추에이터가 동시에 하나의 자유도를 제어하는 것으로서 Fig. 1에서와 같이 Force/torque sum과 velocity sum의 두 가지 경우로 분류된다.

Fig. 2(a)의 이중 액추에이터는 두 개의 링크를 연결해주는 하나의 회전관절의 회전운동을 위한 모듈로서 중심 수직선에 대하여 대칭의 형태로 설계되었으며, 좌우 각 부분은 pancake armature disk, rare earth magnet pad, resolver, brake, Ferguson's paradox epicyclic gear train으로 구성되어 있다. Ferguson's paradox epicyclic gear train은 큰 기어비와 compact 구조로 인하여 선택되었다.



(a) Force/Torque Sum.



(b) Velocity Sum.

Figure 2. Dual Actuator.

또한 하모닉 드라이브를 고려할 수 있으나 상대적으로 나쁜 스티프니스 특성 때문에 위의 설계에서는 선택되지 않았다. Sun기어와 Bull기어는 planetary arm에 고정된 planetary 기어와 맞물려 동작하며, 공간이 허락하는 한 최대한 많은 planet기어를 활용하여 기어의 마모와 처짐을 최소화 하고 load carrying capacity를 늘리고 stiffness를 크게 하도록 설계되었다. 중심선에 위치한 샤프트는 좌우 측의 모터를 연결해 주며, 클러치는 양쪽 모터를 연결시켜 주는 역할을 한다. 양쪽의 모터가 동시에 작동할 때에는 양쪽으로부터의 토크 합이 링크관절에 전달되며, 한쪽의 모터에 고장이 발생한 경우에는 클러치의 작동으로 고장난 부분을 드라이브 트레인에서 분리시키고 나머지 반쪽으로 시스템을 운영하게 된다.

Fig. 2(b)의 이중 액추에이터는 베벨 기어로 구성된 Dif-

ferential drive 시스템으로서 이러한 형태 역시 Fault Tolerance 기능을 제공한다. Ferguson's paradox epicyclic gear train을 활용하여 큰 기어비를 얻으며, 하나의 ring기어는 고정되어 있고 다른 하나의 ring기어는 출력에 연결되어 있다. 이러한 이중 액추에이터는 속도 합의 개념으로서 다양한 속도비를 생성할 수 있으며, 한쪽 액추에이터에 고장이 발생한 경우에는 나머지 한쪽으로 시스템을 운영가능하다. 이 밖에도 여러 가지 형태의 이중 액추에이터가 고안될 수 있다.

Fig. 3은 텍사스 주립대에서 제작된 Fig. 2(a) 형태의 액추에이터를 나타내는데 이중 액추에이터의 한쪽이 분해해체되어 있는 상태를 보여주고 있다[63]. 이 액추에이터는 NASA/JSC(Johnson space center)에서 Space Operation에 적합하도록 설계제작되었으며 현재 이러한 목적으로 성공적으로 활용될 수 있는 가에 관한 성능조사가 진행중이다.

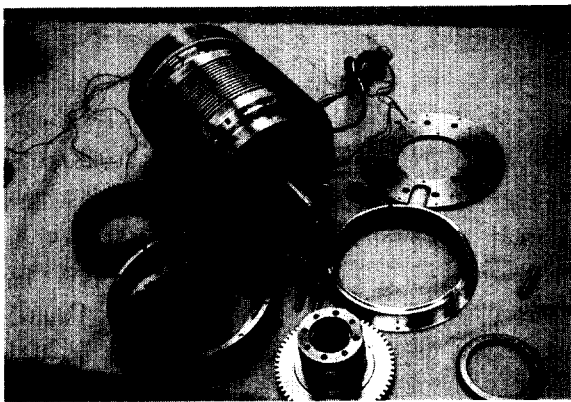


Figure 3. Prototype of Dual Actuator.

5.2 두번째 단계 : 여유구동 병렬형 모듈

병렬형 모듈(parallel module)들은 로봇 제작에 있어서 직렬형 모듈(serial module)들 보다도 그 활용도가 제한되어 왔다. 이것은 고가의 제작비 그리고 제작 상에 있어서의 어려움 때문이었다고 사료된다. 그러나, 병렬형 메카니즘은 구조적으로 여러 개의 폐쇄체인을 지니고 있으므로 지반으로 힘을 여러 개의 지지대를 통해 분산시킨다. 따라서, 이러한 메카니즘은 직렬형 메카니즘이 비해 더 큰 적재하중용량과 강성을 지닌다. 또한 병렬형 메카니즘에 있어서 여분의 잠재적인 구동 위치는 여유구동(redundant actuation)을 가능하게 한다. 이러한 여유구동은 힘 분배와 에너지 소비에 있어서 절약을 가능케 한다[44,58,59]. 또한 여유구동은 시스템의 임의의 액추에이터에 고장이 발생할 때 이에 대처할 수 있는 잠재력을 가지고 있으므로 두번째 단계의 Fault Tolerance로 소개된다.

병렬형 모듈 중 한 종류로서, Fig. 4의 세 개의 다리를 가지는 구형(spherical) 3 자유도 모듈에 관한 전반적인 연구

가 수행되어져 왔다. 각 체인은 세 개의 회전관절로 구성되어 있으며 아홉 개의 관절 축이 한 점에서 만나는 기구학적 구속조건으로 인하여 구형 운동을 가능하게 한다. 관성에 의한 힘을 줄이기 위하여 액추에이터들은 각 체인의 베이스 관절에 부착되어 구동되며, 이러한 병렬형 메카니즘에 있어서 여분의 잠재적인 구동 위치에 추가로 액추에이터를 부착함으로써 시스템에 고장에 대한 내성을 갖는 능력을 부여할 수 있다. 그러나, 부동관절(floating joint)에 액추에이터를 부착하는 경우에는 액추에이터의 자중에 의한 관성힘이 증가되므로, Fig. 5에서와 같이 네 개의 다리를 갖는 구형 3 자유도 메카니즘의 네 개의 베이스관절들에 액추에이터를 부착함으로써 여유구동을 지니는 형태가 고려된다. 실제로 Fig. 5의 메카니즘은 Fig. 4의 경우보다 매우 향상된 힘 전달 특성을 지니며, 하나의 액추에이터에 고장이 발생한 경우에도 나머지 세 개의 액추에이터로 Fig. 4의 45%의 성능을 유지함을 살펴볼 수 있다[44]. Fig. 4의 구형 메카니즘은 고장에 강인한 매니플레이터의 어깨 모듈이나 손목 모듈로서 활용될 수 있다.

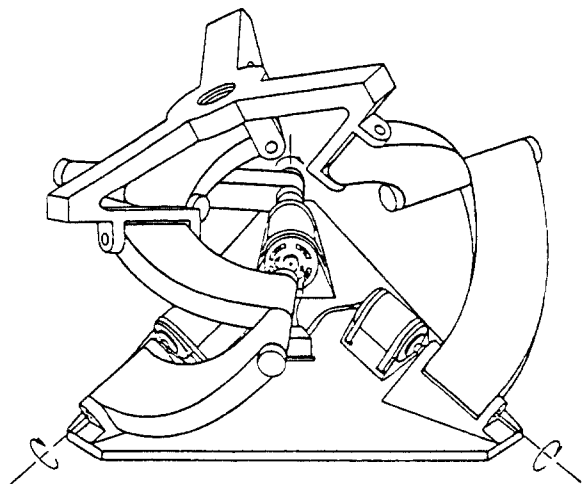


Figure 4. Three Degree-of-Freedom Shoulder Module with Three Legs.

3 자유도에서와 마찬가지로 여유구동을 지니는 6 자유도를 지니는 병렬형 메카니즘을 살펴본다. Fig. 6의 매니플레이터는 네 개의 다리를 지니며, 각 체인은 베이스에 위치한 2 자유도 gimbal 메카니즘과, 가운데의 1 자유도 회전관절, 그리고 상판과 연결된 3 자유도 ball and socket관절로 구성된다. 각 다리의 gimbal 관절에 두 개의 액추에이터를 부착하면 전체 시스템은 여덟 개의 액추에이터로 구동되는 여유구동 시스템이 된다. 따라서, 두 개의 여유 액추에이터로 인하여 시스템의 힘 전달 특성이 향상되며, 고장에 대한 내성을 갖게된다. 또한 첫번째 단계에서 소개한 이중 액추에이터를 각 구동관절에 적용하면 더욱 강력한 Fault Tolerance 효과를 얻을 수 있다[42].

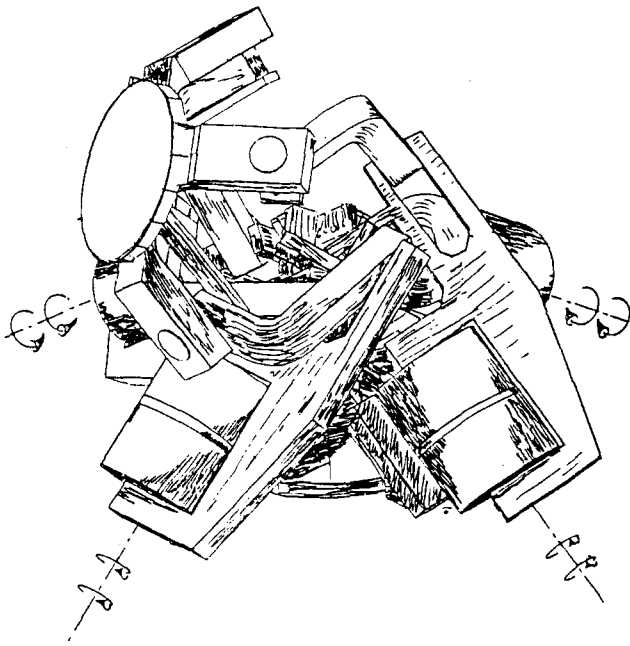


Figure 5. Fault-Tolerant Three Degree-of-Freedom Shoulder Module With Four Legs.

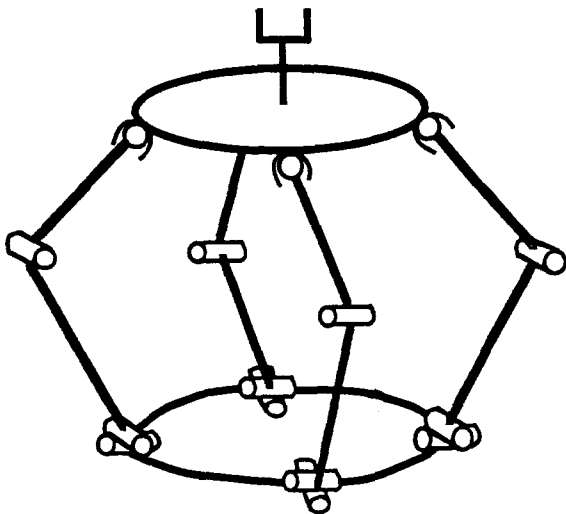


Figure 6. Fault-Tolerant 4-Legged Stewart Platform Module.

5.3 세번째 단계 : 여유 자유도 매니플레이터

세번째 단계에서는 기구학적으로 여유 자유도를 가지는 매니플레이터를 활용한 Fault Tolerance를 고려한다. 이러한 매니플레이터는 여유 자유도 매니플레이터로 칭하며 공간상에서 6 자유도 동작을 만족하기 위하여 여섯 개 이상의 관절을 지닌다. 두번째 단계에서 부여된 여유구동관절들은 기구학적으로 서로 연관을 갖는 반면에 세번째 단계에서의 여유 자유도 매니플레이터의 관절들은 기구학적으로 서로

독립적인 관계를 유지하는 차이점이 있다. 또한, 여유자유도 매니플레이터에서 임의의 관절에 고장이 발생한 경우에는 해당 관절을 브레이크로 잠근 상태에서 나머지 유효관절들로 시스템을 운용한다. 반면에 두번째 단계의 여유구동 메카니즘에서는 임의의 관절에 고장이 발생한 경우에 시스템의 모빌리티가 감소하지 않도록 하기 위하여 고장에 해당되는 관절을 자유로이 풀어놓은 상태에서 나머지 관절들로 시스템을 운영한다. 여유자유도 매니플레이터의 각 관절들은 1 자유도, 2 자유도, 3 자유도, 그 밖의 다자유도 모듈들의 조합으로 이루어진다. 따라서, 세번째 단계의 여유자유도 매니플레이터는 첫번째와 두번째 단계에서 소개된 모듈들로 구성되므로 한층 더 일반적인 Fault Tolerance 효과를 구현할 수 있다.

5.4 네번째 단계 : 여유자유도 매니플레이터로 구성된 다중암(Multiple arms)

네번째 단계에서는 다중 매니플레이터에서의 Fault Tolerance를 고려한다. 고려되는 다중 매니플레이터의 각 체인은 기구학적으로 여유 자유도를 가지는 매니플레이터로 구성된다. 따라서, 네번째 단계는 첫번째, 두번째, 그리고 세번째 단계를 모두 포함하는 가장 일반적인 Fault Tolerance 단계이다. Fig. 7은 이중암으로서 각 체인은 여유자유도 매니플레이터로서 여러 개의 모듈의 조합으로 구성되며, 여러 개의 모듈들은 여유구동을 지니는 병렬모듈이며, 단위 액추에이터들은 이중 액추에이터로 구성되는 네 단계의 Fault Tolerant 매니플레이터 시스템을 나타낸다.

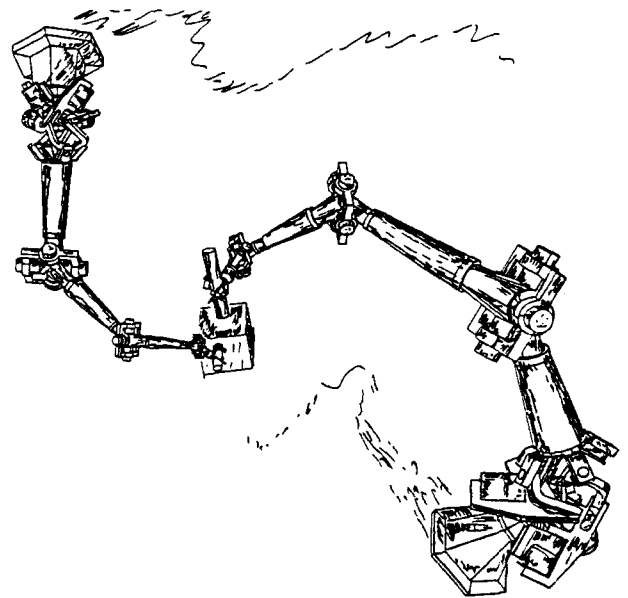


Figure 7. Fault - Tolerant Dual Arm System.

6. 고장에 대한 내성을 갖는 로봇 매니플레이터의 설계 및 성능지수

로봇의 성능을 판단하기 위하여 최대 힘 전달비, 최대 속도 전달비, 등방성비(isotropic index), manipulability, condition number와 같은 기구학적 지수 등을 사용되어져 왔다 [40-46]. 이러한 성능 이외에도, 로봇 관절에 고장이 발생하였을 경우, 지속적으로 작업을 수행할 수 있는 가에 대한 척도를 나타내는 지수들의 개발이 필요로 된다.

6.1 고장에 대한 내성을 나타내는 작업공간지수

로봇의 어느 관절 액츄에이터에 고장이 일어나고 무관하게 항상 사용 가능한 활동 구간을 Fault-Tolerant Workspace($FW\cdot$)라고 정의한다. $FW\cdot$ 는 기구학적 FW 와 힘 차원의 FW 로 구분되어 진다. 기구학적 FW 란 세번째 단계의 여유 자유도 로봇의 경우에 임의의 조인트에 고장이 발생한 경우의 $FW\cdot$ 를 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$FW = FW_1 \cap FW_2 \cap \dots \cap FW_n \quad (19)$$

여기서 FW_i 는 i 번째 관절 액츄에이터가 고장났을 때 고장난 관절을 잠근 상태에서 나머지 관절 액츄에이터들로 사용 가능한 활동 구간을 의미한다. 이러한 $FW\cdot$ 를 크게 하는 것은 Fault-Tolerant 로봇 설계에 있어서 중요한 설계 지수로 삼을 수 있다. 반면에 힘 차원의 FW 란 로봇의 임의의 조인트 액츄에이터에 고장이 발생한 경우에 요구되는 작업을 수행하는데 있어서 관절 액츄에이터에서 요구되는 힘의 Norm값이 정해진 Threshold값 내의 범위에 존재하는 활동 구간의 크기를 나타내며 세번째 단계의 여유 구동 병렬형 로봇에서의 설계 지수로 활용되어질 것이다. 이러한 경우에서 식 (19)의 FW 는 i 번째 관절 액츄에이터가 고장났을 때 고장난 관절을 자유로이 풀어 놓은 상태에서 나머지 관절 액츄에이터들로 요구되는 힘의 Norm값이 정해진 Threshold값 내의 범위에 존재하는 활동 구간의 크기를 나타낸다.

6.2 고장에 대한 내성을 나타내는 기구학적 지수

로봇 시스템의 Fault Tolerance의 정도를 나타내 주는 지수를 개발하기 위하여 입출력간의 관계를 나타내는 자코비안의 성질을 Singular Value Decomposition (SVD)의 기법을 통하여 정의하고자 한다. 출력 벡터(\dot{u}) 그리고 입력 벡터($\dot{\phi}$)의 차원이 각각 m 과 n 일 때, 이에 대한 자코비안 J 는 $m \times n$ 의 차원을 지니고, SVD기법[55]을 이용하면 다음과 같은 형태로 나타내어진다.

$$\dot{u} = J\dot{\phi} = UDV^T\dot{\phi} \quad (20)$$

여기서, U 와 V 는 각각 $m \times m$ 의 출력공간에 관계된 직교벡터(Orthogonal vector)로 구성된 행렬과 $n \times n$ 의 입력공간

에 관계된 직교벡터로 구성된 행렬을 의미한다. 즉,

$$U = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m] \quad (21)$$

그리고

$$V^T = [R \ | \ N]^T \quad (22)$$

여기서, $R^T \ N^T$ 는 각각 순공간(range space)과 영공간(null space)을 나타내며 $m \times n$ 과 $(n-m) \times n$ 의 차원을 가지며 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} R^T \\ N^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1^T \\ v_2^T \\ \vdots \\ v_m^T \\ v_{m+1}^T \\ \vdots \\ v_n^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{2,1} & \dots & v_{n,1} \\ v_{1,2} & v_{2,2} & \dots & v_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1,m} & v_{2,m} & \dots & v_{n,m} \\ v_{1,m+1} & v_{2,m+1} & \dots & v_{n,m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1,n} & v_{2,n} & \dots & v_{n,n} \end{bmatrix} \cdot \quad (23)$$

또한, D 는 다음과 같이 대각행렬의 형태로 이루어 진다

$$D_{mn} = \begin{pmatrix} \sigma & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_m & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \cdot \quad (24)$$

여기서 σ_i 는 특이값(singular value)을 나타내며, 가장 작은 특이값(σ_m)은 관절공간 속도로부터 작업공간 속도로의 전달이 가장 나쁜 경우를 의미한다.

Lewis와 Maciejewsky[50]는 여유 자유도 매니플레이터의 고장에 대한 내성을 갖는 성능을 표현하기 위하여 각각의 고장난 관절에 해당하는 열을 시스템 자코비안에서 제거한 나머지에 해당되는 자코비안 (fJ)들에 대한 최소 특이값($\sigma_{\min}({}^fJ)$)들을 구하여 그 중에서 최소의 값을 고장에 대한 내성을 나타내는 지수(kinematic fault tolerant measure : kfm)로 삼았다. 이 지수는 아래의 식으로 표현된다.

$$kfm = \min(\sigma_{\min}({}^fJ), f = \{1, \dots, n\}) \quad (25)$$

여기서 $F \subset f$ 이고 fJ 는 F 의 셋에 해당하는 관절들이 고장난 경우에 시스템 자코비안으로부터 그 관절들에 해당되는 열들을 뺀 나머지 행렬에 해당된다. 식 (25)의 $\sigma_{\min}({}^fJ)$ 는 다음과 같이 정의되는 속도에 관한 Rayleigh Quotient의 관계에서[44]

$$\sigma_{\min}({}^fJ) \|\dot{\phi}\| \leq \|\dot{u}\| \leq \sigma_{\max}({}^fJ) \|\dot{\phi}\| \quad (26)$$

관절 공간 속도로부터 작업 공간 속도로의 전달이 가장 나쁜 경우를 의미한다. 따라서, kfm 이 클수록 고장에 대한 내

성을 갖는 기능이 좋다고 하겠다.

관절에 고장이 발생한 경우에 로봇의 성능을 나타내는 지수로서 다음에서 정의되는 최대 힘 전달비를 나타내는 지수 (*mkfm*)를 고려할 수 있다. 각각의 고장난 관절에 해당하는 열을 시스템 자코비안에서 제거한 나머지에 해당되는 자코비안(iJ)들에 대한 최대 특이값($\sigma_{\max}({}^iJ)$)들을 구하여 그 중에서 최대의 값을 고장에 대한 내성을 나타내는 지수 (maximum kinematic fault tolerant measure : *mkfm*)로 삼았다. 이 지수는 아래의 식으로 표현된다.

$$mkfm = \max(\sigma_{\max}({}^iJ), f = \{1, \dots, n\}) \quad (27)$$

여기서 $\sigma_{\max}({}^iJ)$ 는 다음의 힘에 관한 Rayleigh Quotient의 관계에서

$$\sigma_{\min}({}^iJ) \|T_u\| \leq \|T_\phi\| \leq \sigma_{\max}({}^iJ) \|T_u\| \quad (28)$$

작업 공간으로부터 관절 공간으로의 힘 전달 효율이 가장 나쁜 경우를 의미한다. 속도 전달과는 반대로 *mkfm*이 작을수록 필요 되는 구동량이 감소하므로 고장에 대한 내성을 갖는 기능은 향상된다고 하겠다.

이상에서는 로봇의 관절에 고장이 발생한 경우에 속도 특성 또는 힘 특성에 대한 고장에 대한 내성을 나타내는 지수에 대한 정의를 하였는데 실제의 로봇 작업에서는 속도와 힘 특성을 동시에 만족시킬 수 없으므로 로봇의 균일한 기구학적 성질을 나타내는 등방성 지수로서 최소 특이값과 최대 특이값(isotropic kinematic fault tolerant measure; *ikfm*)의 비율을 고려할 수 있다[46]. 즉,

$$ikfm = \min(\sigma_{\min}({}^iJ) / \sigma_{\max}({}^iJ), f = \{1, \dots, n\}) \quad (29)$$

또한 힘과 속도의 중요도가 다른 경우에는 가중치(weighting)를 부여하여 새로운 성능지수를 정의할 수 있다. 그러나, 이러한 경우에는 힘과 속도가 각각 단위가 다르기 때문에 가중치를 부여하여 하나의 성능지수로 정의하는데 있어서 주의를 기울여야 한다. 이러한 지수(*ikfm*)를 활용하여 최근에 다음과 같은 두 가지 형태의 로봇(즉, 기구학적 여유 자유도 로봇과 여유 구동 로봇)에서의 특성에 대하여 조사하였다[45, 46]. 여기서 여유 자유도 로봇은 3자유도를 가지는 직렬 구조를 가지고 있으며 출력을 2자유도 공간으로 정하여 하나의 여유 자유도를 가지는 경우이다. 2자유도 여유구동 로봇은 두 개의 직렬 부속 체인으로 형성되는 병렬 구조를 가지며 기저면에 고정된 관절들과 하나의 부동관절(floating joint)에 추가로 액츄에이터를 부착하여 구동하는 경우이다.

6.3 영공간을 이용한 고장에 대한 내성 해석

다음은 영공간을 이용하여 여유 자유도 로봇의 고장에 견디는 기능을 지니기 위한 충분조건에 관하여 간략하게 기술

한다. 우선, 자코비안이 랭크(rank) m 을 가지는 경우(즉, $\sigma_i \neq 0, i=1 \dots m$)에 식 (20)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$U^{-1}\dot{u} = DV^T\phi = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_m & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} R^T \\ -N^T \end{bmatrix} \phi \quad (30)$$

여기서 R 과 N 은 각각 순공간(range space)과 영공간(null space)를 나타내며, 순속도 벡터($\dot{\phi}_{net}$)와 영속도 벡터($\dot{\phi}_{null}$)는 아래와 같이 정의된다[62].

$$\dot{\phi}_{net} = R^T \dot{\phi} \quad (31)$$

$$\dot{\phi}_{null} = N^T \dot{\phi} \quad (32)$$

식 (32)를 다시 표현하면

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_{null3} \\ \dot{\phi}_{null3} \\ \vdots \\ \dot{\phi}_{null(n-m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{i,m+1} & \dots & v_{i,m+1} & \dots & v_{n,m+1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ v_{1,n} & \dots & v_{i,n} & \dots & v_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_n \end{bmatrix} \quad (33)$$

식 (33)의 i 번째 열의 요소들인 $v_{i,m+1}, v_{i,m+2}, \dots, v_{i,n}$ 가 모두 0이라면 관절 i 의 속도 변수 $\dot{\phi}_i$ 가 영공간에 속하지 않음을(즉, 자가 운동에 기여하지 않음을) 의미한다. 이것은 관절 i 의 속도 변수 $\dot{\phi}_i$ 가 0이 되는 경우(잠겨지는 경우)에 현재의 형상에서 영공간에 속한 관절들은 이러한 관절의 고상 발생으로 인한 출력속도 부분의 손실에 대한 보상이 가능하지 않음을 나타낸다.

예를 들어서, Fig. 8의 매니플레이터는 N 개의 관절을 가지고 있는 여유 자유도 로봇을 나타낸다. 그러나, 이 로봇의 베이스 관절은 다른 세 개의 관절들과 서로 수직(orthogonal)의 형태로 배치되어 있으므로 이 관절의 고장시 다른 관절들로 그 역할이 보상될 수 없음을 쉽게 알 수 있다. 이러한 사실은 첫번째 관절의 속도 변수 $\dot{\phi}_1$ 는 영공간에 존재하지 않음을 의미하며 식 (33)의 행렬에서 첫번째 열의 모든 요소들이 0이 되는 것을 통하여 확인할 수 있다.

7. 로봇 매니플레이터의 고장감지

본 절에서는 로봇 관절부분의 센서와 액츄에이터에 고장이 발생하는 경우에 Parity relation과 parameter identification 방법과 같은 residual generation 접근방식의 감지방

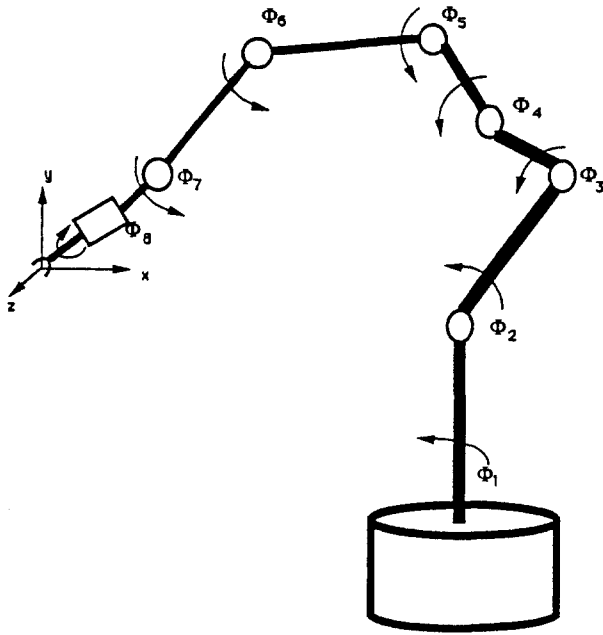


Figure 8. N-DOF Spatial Manipulator Without Available Redundancy.

법들에 관하여 기술한다.

7.1 센서고장감지

로봇의 관절부분에는 위치 센서와 속도 센서가 일반적으로 장착이 되며 이들이 서로 미분 또는 적분관계를 가지고 있다는 사실을 활용하면 두 센서로부터 차이(residual)로부터 쉽게 고장을 감지할 수 있다. 그러나, 이 중 어떠한 센서가 고장인지를 규명하기 위해서 이 밖에 추가로 각 관절에 가속도 센서를 장착할 수 있다. 실제 시스템의 경우 동시에 한가지 이상의 센서에 고장이 발생한다는 상황은 거의 발생하지 않으므로 이러한 가정을 적용하여 고장감지방법에 대하여 구체적으로 기술하기로 한다.

먼저, 관절에 추가로 1자유도 가속도 센서를 장착한 경우에 먼저 $\theta_p, \dot{\theta}_p, \ddot{\theta}_p$ 를 각각 위치 센서, 속도 센서, 그리고 가속도 센서로부터 측정된 값이라고 하자. $\hat{\theta}_p, \hat{\dot{\theta}}_p, \hat{\ddot{\theta}}_p, \hat{\theta}_v, \hat{\dot{\theta}}_v, \hat{\ddot{\theta}}_v$ 를 각각 속도 센서와 가속도 센서로부터 측정된 값을 적분하여 얻어진 등가의 위치, 위치센서와 가속도 센서로부터 측정된 값을 미분 또는 적분하여 얻어진 등가의 속도, 그리고 위치 센서와 속도 센서로부터 측정된 값을 적분하여 얻어진 등가의 가속도라고 하자. 그리고 위치 센서와 속도 센서로부터의 측정치의 차이를 각각

$$\varepsilon_{pv} = |\theta_p - \hat{\theta}_v| \quad (34)$$

$$\varepsilon_{vp} = |\dot{\theta}_v - \hat{\dot{\theta}}_p| \quad (35)$$

라고 하자. 이때 이들 두 값 ε_{pv} 와 ε_{vp} 가 설정된 threshold값

보다 적은 경우 이 두 센서들은 고장이 없는 상태를 나타낸다. 그러나, 그렇지 않은 경우는 둘 중의 한가지 센서에 고장이 발생한 상태를 의미하며 이 때는 가속도 센서와 위치 센서 그리고 가속도 센서와 속도 센서사이의 차이를 비교분석함으로써 고장이 발생한 센서를 찾아낼 수 있다. 즉, ε_{pv} 와 ε_{vp} 를 각각

$$\varepsilon_{pv} = |\dot{\theta}_v - \hat{\dot{\theta}}_p| \quad (36)$$

$$\varepsilon_{vp} = |\theta_p - \hat{\theta}_v| \quad (37)$$

로 정의하고 이 값들 중에 어느 하나가 또는 모두가 설정된 threshold값보다 큰 경우는 이에 해당하는 센서에 고장이 발생되었다는 것을 의미한다.

한편, 이중 액추에이터를 활용하는 경우에는 각 관절에 두 쌍의 위치 센서와 속도 센서가 장착이 되므로 이러한 경우에는 추가의 가속도 센서 없이도 위와 유사한 방법으로 고장이 발생된 센서를 감지할 수 있다. 한편, 관절에 부착된 센서들 이외에 로봇 끝단의 위치나 속도 또는 가속도 정보를 얻기 위하여 ultrasonic ranging 센서나 camera 등과 같은 센서, 또는 로봇 끝단에 가속도 센서가 부착되어 활용되는 경우 이들로부터 측정된 값들을 각각 적분 또는 미분한 후

$$\hat{\theta} = f^{-1}(u) \quad (38)$$

$$\hat{\dot{\theta}} = [G_{\theta}^u]^{-1} \dot{u} \quad (39)$$

$$\hat{\ddot{\theta}} = [G_{\theta}^u]^{-1} \ddot{u} - \hat{\theta}^T [H_{\theta\theta}^u] \hat{\theta} \quad (40)$$

와 같은 로봇의 위치, 일차, 이차 기구학 모델의 역관계식을 이용하여 각 관절에서의 등가의 위치, 속도, 가속도에 대한 측정치를 구할 수 있으며 이러한 정보는 위와 유사한 방법을 적용함으로써 고장이 발생한 센서를 감지할 수 있다. 그러나, 위 식에서 $[G_{\theta}^u]$ 와 $[H_{\theta\theta}^u]$ 는 각각 관절변수(θ)의 함수이므로 먼저 위치에 대한 고장을 진단한 후, 속도에 대한 진단이 수행되어야 하며, 위치 센서에 고장이 발생한 경우는 로봇의 위치나 속도의 연속성을 고려하여 바로 전 단계의 정보를 활용함으로써 고장에 대한 진단이 가능하다. 이와 같이 로봇끝단에 부착된 센서를 활용하는 경우에 있어서는 상대적으로 정밀한 진단은 어렵지만 경제적인 측면이나 하드웨어의 소형화 등의 관점에서 많은 이점이 있다. 한편, 수치미분의 경우 많은 오차가 발생되므로 이러한 경우에 cubic spline에 의한 interpolation이나 third-order backward formula 등과 같은 근사미분방법이 사용된다[56].

7.2 액추에이터 고장감지

먼저 위치, 속도, 가속도 센서 등에 고장이 발생되지 않았으며 이로부터의 feedback 신호가 신뢰성이 있는 정보라는 가정 하에서 액추에이터의 고장감지가 수행될 수 있다. 로봇 시스템의 동역학 모델은

$$\tau = \tau [I_{\theta\theta}^*] \theta + \theta^T [P_{\theta\theta}^*] \theta^T \quad (41)$$

로 표현되며 여기서 $[I_{\theta\theta}^*]$ 와 $[P_{\theta\theta}^*]$ 는 각각 유효관성행렬과 Coriolis와 centripetal 요소를 나타내는 순수한 관절변수만의 함수로 표현되는 3 차원 어레이(power modeling array)를 나타낸다. 액추에이터의 고장을 감지하기 위해서 로봇 끝단이나 각 관절에 여분의 토크 센서를 부착한 경우 센서고장감지의 경우와 동일한 방법으로 액추에이터의 고장을 감지할 수 있다. 그러나, 일반적으로 위와 같은 로봇 시스템의 정확한 동력학 모델을 구하는 것은 매우 어려우므로 고장진단에 있어서 다소 신뢰성이 감소되기 때문에 threshold값이 상대적으로 보수적으로 설정되어야 하는 단점이 있다.

한편, system parameter identification 방법은 액추에이터 고장을 진단하는데 자주 활용되는 방법으로서 오직 고장난 액추에이터를 감지하는 기능만이 가능하다. 이러한 방법은 여분의 센서가 요구되지 않으며 로봇 시스템의 각 인자들에 문제가 발생하였을 경우에 출력에 있어서 어떠한 응답이 나타나는가에 대한 pattern(양상)을 분석함으로써 시스템 인자들의 측정값을 구하며 이들 값이 nominal mean 값(μ_{0j})으로부터 얼마나 오차가 있는가에 대한 정도를 판단함으로써 고장난 요소를 감지한다[57].

8. 고장회복

먼저 로봇 시스템에 고장이 발생한 후에도 지속적인 제어가 가능한 여분의 제어능력을 가지고 있다고 가정한다. 이러한 로봇이 주어진 작업을 수행하기 위해서는 고장난 부분을 제외한 나머지 시스템에 알맞도록 제어규칙이 재조정되어야 하며 고장회복은 이러한 과정을 의미한다. Fig. 9는 고장회복 시스템에 대한 간략한 계통도를 나타낸다. 그러면 본 절에서는 앞 절에서 언급한 네 가지 고장에 대한 내성을 갖는 구조들에 대해 각각의 경우에 어떠한 방법으로 고장회복을 수행하는가에 대하여 간략하게 기술한다.

8.1 이중 액추에이터에서의 고장회복

앞에서 이미 언급한 바와 같이 미국 오스틴 소재 텍사스 주립대에서는 대칭형태의 모터와 Ferguson's Paradox drive trains을 이용하여 이중 구동 액추에이터를 개발하였는데 이러한 시스템의 경우 모든 요소들이 각각 두 개의 독립된 기능을 하도록 제작되었다[63]. 그러므로, 시스템의 각 요소의 신뢰성에 대한 정보에 근거하여 제어 계인에 가중치를 부여함으로써(또는 이에 맞도록 제어 계인을 가변함으로써) 고장회복을 수행할 수 있으며, Fig. 10은 이에 대한 개념적인 서보 제어기에 대한 계통도이다.

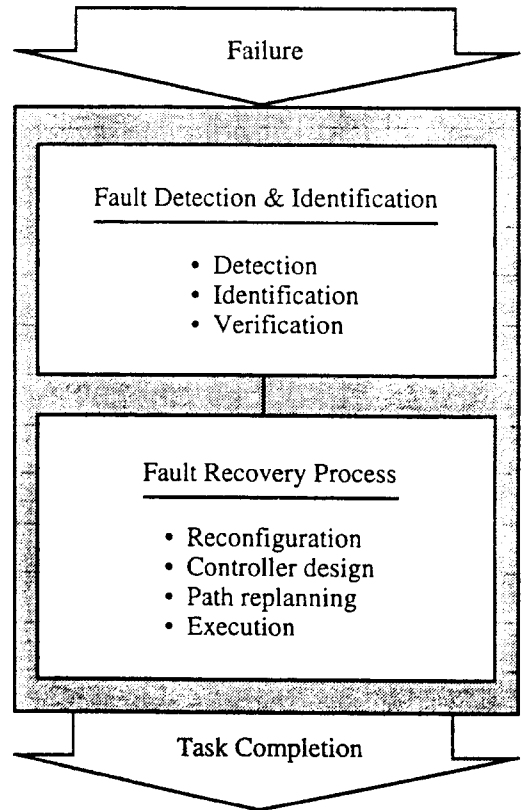


Figure 9. Fault Recovery System.

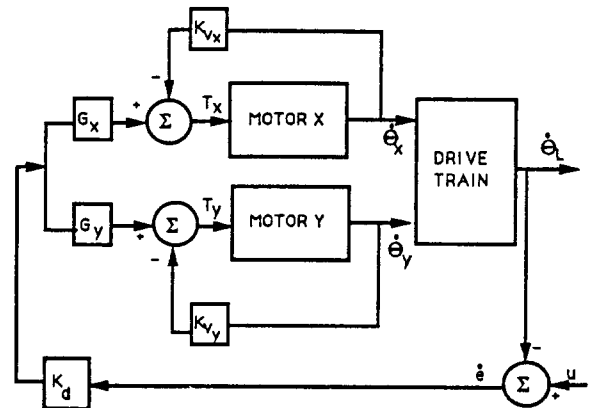


Figure 10. Schematic of Conceptual Servo System for Dual-Sided Actuators.

한편, differential drive actuator의 경우 Fig. 11에서와 같이 다음과 같은 서보 제어규칙을 활용하는 경우,

$$\tau_x = -K_{vx} \dot{\theta}_x + G_x K_d (u - \dot{\theta}_L) \quad (42)$$

$$\tau_y = -K_{vy} \dot{\theta}_y + G_y K_d (u - \dot{\theta}_L) \quad (43)$$

각 액추에이터의 신뢰성에 따라 게인 G_x 와 G_y 의 값을 조절함으로써 고장회복을 수행할 수 있다[2].

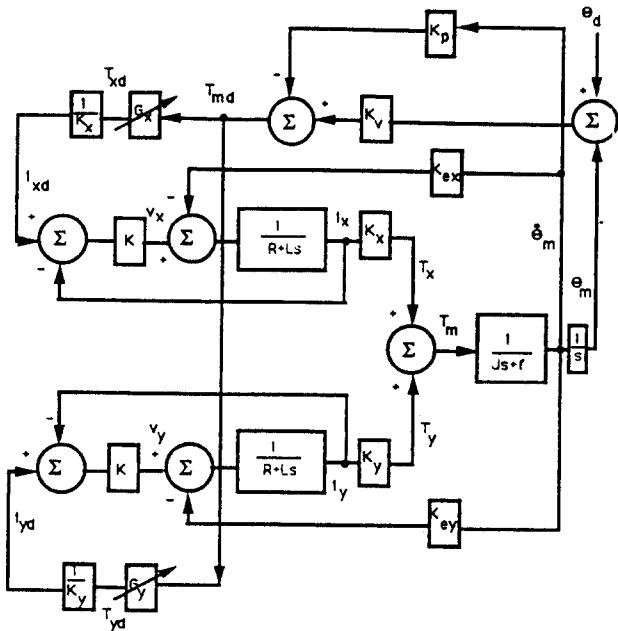


Figure 11. Schematic of a Conceptual Servo System for Differential Actuators.

8.2 단계 II에서의 고장회복

병렬형 로봇 시스템의 경우 시스템 구동에 필요한 최소한의 구동 액추에이터 이외에 여분의 액추에이터를 passive 관절에 부착할 수 있는 구조를 가지고 있다. 그러므로, 고장이 발생되지 않은 상태에서도 이러한 여분의 액추에이터를 활용하여 적절하게 각 관절 액추에이터에서의 소요 구동력을 분배하는 연구들이 진행되고 있다[44,58,59]. 고장이 발생한 이후에도 이러한 기법들은 그대로 활용될 수 있으나 고장으로 인한 충격효과를 감소시키는 기법이 또한 매우 중요한 관점중의 하나이다[59]. 병렬 메카니즘의 임의의 관절에서 고장이 감지되면 시스템의 운영에 영향을 미치지 않게 하기 위하여 순간적으로 고장난 관절을 자유로이 풀어주며, 나머지 관절들로 시스템을 운영하도록 힘 분배가 다시 이루어져야 한다. 또한 이러한 상황에서 순간적으로 발생하는 shock은 시스템의 제어에 영향을 미치므로 shock을 최소화하는 알고리즘도 고려되어야 하겠다. 기본적인 제어방식으로는 Fig. 12의 Computed Torque 기법을 활용할 수 있으며 [3] 고장 감지시 shock를 줄이며 토크를 재분배하는 알고리즘이 추가된다.

8.3 단계 III에서의 고장회복

여유 자유도를 가지는 로봇 시스템의 경우 임의의 관절 액추에이터에 고장이 발생하여 부분적으로 액추에이터의 출력 토크 용량이 감소되는 경우와 액추에이터가 완전히 고장나는 두 가지 경우를 고려할 수 있는데, 이로 인하여 로봇 끝단에서의 주어진 경로를 추적하는데 어려움이 발생된다. 관

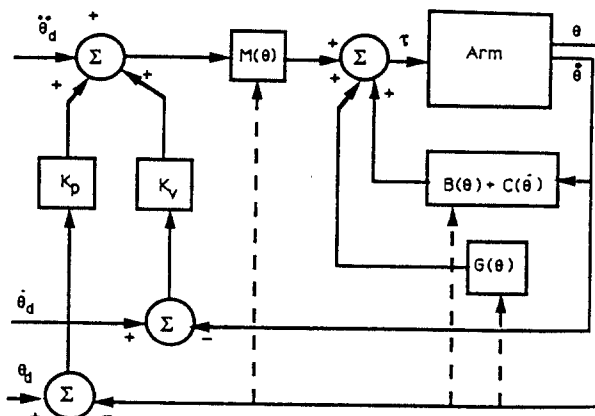


Figure 12. Computed Torque Controller.

절 액추에이터의 출력 토크 용량이 부분적으로 감소되는 고장인 경우는 주어진 경로를 수정하여 느린 속도로 추적하게 하는 방법 (trajectory time scaling)[4,60]과 감소된 관절의 토크 용량을 감안하여 비중치를 두고 각 관절에 적절히 토크를 분배하는 방법들 (weighted redundancy resolution methods)이 사용될 수 있다. 특히, 여유 자유도를 가지는 로봇 시스템에 있어서 임의의 관절 액추에이터가 완전히 고장나는 경우에, 첫째로 고장이 난 관절을 브레이크를 작동하여 잠그고 나머지 관절로서 주어진 작업을 수행하는 방법이 있고, 둘째로 고장이 난 관절을 수동관절 (passive joint) 상태로 유지하면서 동적 연관효과 (dynamic coupling effect)를 활용하는 방법이 활용될 수 있다[61].

임의의 관절 액추에이터의 완전 고장시, 고장이 난 관절을 브레이크를 작동하여 잠그는 경우에는 Fig. 13에서와 같이 가상의 링크 (virtual link)가 형성된다. 여유구동을 지닌 병렬형 메카니즘에서와는 달리 이러한 상황에서는 시스템의 Jacobian 관계식과 시스템의 모든 동역학 모델이 바뀌므로 이에 관련된 Fault tolerant 소프트웨어가 고려되어야 한다.

8.4 단계 IV에서의 고장회복

이중 또는 다중 로봇의 경우 I, II, III 단계를 모두 내포하고 있는 구조를 가지고 있으므로 앞 절에서 활용된 고장회복에 관한 모든 방법들이 그대로 활용될 수 있다. 이중 또는 다중 로봇 시스템이 동시에 한 작업을 수행할 경우에는 매니플레이터간에 적절히 힘을 분배하는 알고리즘들이 필요하다. 작업 수행 중에 하나의 로봇 또는 로봇의 일부 액추에이터에 고장이 발생하는 경우에는 각 단계별로 고장회복 방법을 활용할 수 있으며 또한 힘 분배 알고리즘의 수정이 필요하다. Fig. 14은 고장에 대한 내성을 지니는 매니플레이터 시스템의 네 단계의 Subsumptive Fault Tolerant Architecture를 나타낸다.

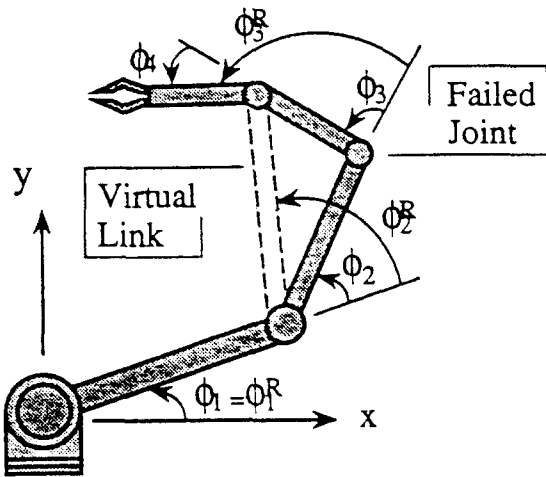


Figure 13. 4-DOF Fault-Tolerant Manipulator.

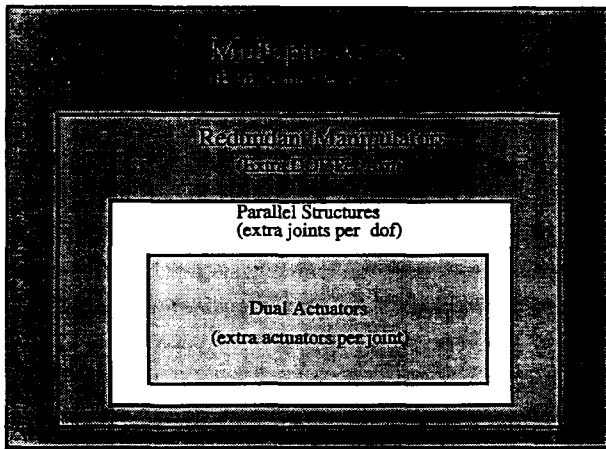


Figure 14. Four-Level Subsumptive Architecture.

9. 결 론

본고에서는 먼저 일반적인 시스템이 고장에 대한 내성을 갖기 위해 요구되는 특성, 이러한 시스템을 구현하기 위한 접근 방식, 그리고 이들을 평가할 수 있는 척도들에 관하여 간략하게 기술하였다. 그리고 고장에 대한 내성을 갖는 로봇 매니플레이터 시스템에 관한 최근의 연구동향과 이러한 로봇 시스템의 구조적 측면을 고려한 네 가지 단계의 설계에 관하여 살펴보았고, 고장에 대한 내성을 갖는 로봇 시스템의 설계 및 성능을 판단하기 위한 몇 가지 지수들에 대하여 살펴보았다. 마지막으로 로봇의 관절부분에 고장이 발생하는 경우 각 네 가지 단계에서의 고장감지 및 고장회복에 관하여 살펴보았다.

국외에서는 이미 이러한 고장에 내성을 갖는 로봇 시스템

에 관한 연구가 매우 활발히 진행되고 있으나, 국내에서는 이러한 분야에 관한 연구는 매우 미약한 실정이다. 그러나, 이러한 로봇 시스템에 관한 연구는 Remote site, FMS, 그리고 CIM등에 있어서의 작업공정에서 활용되는 로봇의 고장에 대한 내성을 증가시킴으로서 로봇의 고장으로 인한 작업의 중단과 같은 치명적인 상황을 감소시키기 위한 연구분야이며 앞으로 매우 중요한 연구분야로 부각될 것으로 사료된다. 본고에서는 고장에 대한 내성을 갖는 로봇 시스템에 관련된 전반적인 연구분야에 대한 소개를 하였으며 구조적인 측면에 중점을 두어 기술되었으나, 고장에 내성을 갖는 위치/속도 센서, 힘/토크 센서 그리고 로봇 제어에 관련된 하드웨어와 소프트웨어 등과 같은 로봇 구성 요소들의 개발에 관한 연구, 고장이 발생하였을 경우에 수행중인 작업을 지속적으로 그리고 성공적으로 수행할 수 있도록 하는 고장회복을 위한 제어기법 등에 관한 구체적인 방법 등에 대하여 매우 활발한 연구가 필요 된다. 마지막으로, 이러한 고장에 대한 내성을 갖는 로봇 매니플레이터의 개발에 관한 중요성이 인식되어 국내에서도 높은 관심과 더불어 활발한 연구가 진행되었으면 한다.

참 고 문 헌

- [1] Tesar, D., Sreevijayan, D., and Price, C.R., 1990, "Four-Level Fault Tolerance in Manipulator Design for Space Operation," Proc. of the First Int. Symp. on Measurement and Control in Robotics, Houston, TX.
- [2] Wu, E., Difler, J., Hwang, J., and Chladek, J. K., 1991, "A Fault-Tolerant Joint Drive System for Space Shuttle Remote Manipulator System," Proc. of IEEE Robotics and Automation Conf., pp. 2504-2509.
- [3] Sreevijayan, D., 1992, "On the Design of Fault-Tolerant Robotic Manipulator Systems," M.S. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, The University of Texas at Austin.
- [4] Ting, Y., 1993, "Fault-Tolerant Control Algorithms for Serial and Parallel Manipulators," Ph.D. Dissertation, Dept. of Mechanical Eng. University of Texas at Austin, Austin, TX.
- [5] Ting, Y., Tosunoglu, S., and Tesar, D., 1993, "A Control Structure for Fault-Tolerant Operation of Robotic Manipulators," Proc. of IEEE Robotics and Automation Conf., pp. 684-690.
- [6] Ting, Y., Tosunoglu, S., and Freeman, R.A., 1993, "Actuator Saturation Avoidance for Fault-Tolerant

- ant Robots," Proc. of IEEE Decision and Control Conf. pp.
- [7] Tosunoglu, S., 1993, "Fault Tolerance for Modular Robots," Proc. of IECON '93, pp. 1910-1914.
- [8] Pearson, J. L., 1977, "Petri Nets," ACM Computing Surveys, Vol. 9, No.3, pp. 223-252.
- [9] Desrochers, A. A., and Al-Jaar, R. Y., 1990, "Petri Nets in Automation and Manufacturing," Advances in Robotics and Automation, Vol.2, JAI Press.
- [10] Fussell, J. B., 1975, "Fault Tree Analysis-Concepts and Techniques," Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Generic Techniques of System Reliability Assessment, Nordhoff, Leiden, Netherlands.
- [11] Dugan, J. B., et al., 1984, "Extended Stochastic Petri Nets : Application and Analysis," PERFORMANCE '84, Models of Computer System Performance, Elsevier.
- [12] Ammar, H. H., Huang, Y. F., and Liu, R. W., 1987, "Hierarchical Models for Systems Reliability, Maintainability, and Availability," IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. CAS-34, No. 6, pp. 629-638.
- [13] Johnson, A. M., and Malek, M., 1988, "Survey of Software Tools for Evaluating Reliability, Availability, and Serviceability," ACM Computing Surveys, Vol. 20, No. 4, pp. 227-269.
- [14] Potter, J. E., and Suman, M. C., 1986, "Extension of the Mid-value Selection Technique for Redundancy Management of Inertial Sensors," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 9, No. 1, pp. 37-44.
- [15] Johnson, B. W., 1988, "Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems," Addison-Wesley, Reading, MA.
- [16] Kellock, B., 1988, "Sound Out the Merits of Machine Monitoring," Machinery and Production Eng., pp. 24-31.
- [17] Kryter, R. C., and Haynes, H. D., 1989, "Condition Monitoring of Machinery Using Motor Current Signature Analysis," Sound and Vibration, pp. 14-21.
- [18] Krishnamurthi, M., Mayer, R. J., and Friel, P. G., 1986, "Robot Fault Diagnosis Using Deep and Shallow Modeling Approaches," Robotics and Expert Systems-1986, pp. 269-278.
- [19] Hormann, K., Hubner, T., and Rembold, V., 1990, "An Expert System for the Diagnosis of Faults of Industrial Robots," Robotics and Manufacturing Recent Trends in Research, Education, and Applications, pp. 771-776.
- [20] Padalkar, S., et al., 1991, "Real-Time Fault Diagnosis with Multiple Aspect Models," Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 803-808, Sacramento, CA.
- [21] Martin, R. P., and Nassersharif, B., 1988, "A Diagnostic Expert System for Analyzing Multiple Failure Transients in Nuclear Power Plants," Proc. of the First Int. Conf. on Industrial and Eng. Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, Vol. I, pp. 75-79, Tullahoma, TN.
- [22] Dietz, W. E., Kiech, E. L., and Ali, M., 1988, "Pattern-Based Fault Diagnosis Using Neural Networks," Proc. of the First Int. Conf. on Industrial and Eng. Applications of Artificial Intelligence and Expert System, Vol. I, Tullahoma, TN.
- [23] Kaliyur, K. M., 1990, "Fault Detection Using Neural Networks," Master's Thesis, Dept. of Electrical Eng. University of Texas at Austin, Austin, Tx.
- [24] Hall, S. R., 1982, "Parity Vector Compensation for FDI," Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- [25] Lou, X. C., Willsky, A. S., and Verghese, G. C., 1986, "Optimally Robust Redundancy Relations for Failure Detection in Uncertain Systems," Automatica, Vol. 22, No. 3, pp. 333-344, Pergamon Press.
- [26] Horak, D. T., "Failure Detection In Dynamic Systems with Modeling Errors," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 11, No. 6, pp. 508-516.
- [27] Watanabe, K., and Himmelblau, D. M., 1982, "Instrument Fault Detection in Systems with Uncertainties," Int. Journal of Systems Science, Vol. 13, No. 2, pp. 137-158.
- [28] Frank, P. M., 1990, "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-Based Redundancy-A Survey and Some New Results," Automatica, Vol. 26, No. 3, pp. 459-474.
- [29] Frank, P. M., 1990, "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-Based Redundancy-A Survey and Some New Results,"

- Automatica, Vol. 26, No. 3, pp. 459-474.
- [30] Hancock, J. C., and Wintz, P. A., 1966, "Signal Detection Theory," McGraw Hill, New York.
- [31] Wetherill, G. B., 1975, "Sequential Methods in Statistics," Chapman and Hall, London.
- [32] Daly, K. C., Gai, E., and Harrison, J. V., 1979, "Generalized Likelihood Ratio Test for FDI in Redundant Sensor Configurations," Journal of Guidance and Control, Vol. 2, No. 1, pp. 9-17.
- [33] Hall, S. R., 1982, "Parity Vector Compensation for FDI," Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- [34] Willsky, A. S., 1976, "A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems," Automatica, Vol. 12, pp. 601-611, Pergamon Press.
- [35] Miller, I., and Freund, J. E., 1985, "Probability and Statistics for Engineering," Englewood Cliffs, N. J.
- [36] Chow, E. Y., and Willsky, A. S., 1984, "Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-29, No. 8, pp. 603-614.
- [37] Gerler J. J., 1988, "Survey of Model-Based Failure Detection and Isolation in Complex Plants," IEEE Computer Systems Magazine.
- [38] Chien, T. T., and Adams, M. B., 1976, "A Sequential Failure Detection Technique and its Applications," IEEE Trans. on Automatic Control, pp. 750-757.
- [39] Von Neumann, J., 1966, "Automata Studies," Annals of mathematics Studies, No. 34, edited by C.E. Shannon and E. F. Moore, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [40] Klein, C.A. and Blaho, B.E., 1987, "Dexterity for Design and Control of Kinematically Redundant Manipulator," Int. Journal of Robotics Research, Vol. 6, No. 2, pp. 72-83.
- [41] Kurtz, R. and Hayword, V., W., 1992, "Multiple-Goal Kinematic Mechanism Optimization of a Parallel Spherical Mechanism with Actuator Redundancy," Trans. on Journal of Robotics and Automation, Vol. 8, No. 5, pp. 644-651.
- [42] Yi, Byung-Ju and Kim, Whee-Kuk, 1994, "Optimal Design of a Redundantly Actuated 4-Legged Six Degree of Freedom Parallel Manipulator Using Composite Design Index," KSME Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 385-403.
- [43] 이병주, 김희국, 1994, "고장에 견디는 매니플레이터의 설계," 94대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 687-692.
- [44] 이병주, 김희국, 1994, "고장에 강인한 구형 3 자유도 모듈의 기구학적 해석," 대한기계학회논문집 제18권, 제11호, pp. 2846-2859.
- [45] 이병주, 김희국, 김동구, 1995, "여유 구동/자유도 매니플레이터의 고장에 견디는 성능에 대한 해석," 대학기계학회 논문집, 제19권 제11호, pp. 2927-2938.
- [46] 김희국, 김동구, 이병주, 1996, "고장에 견디는 공간형 여유자유도 매니플레이터의 최적설계에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제13권 제4호, pp. 97-108.
- [47] Sweeney, F., 1987, "Robotics for Nuclear Reactors and Hazardous Environments," Oak Ridge National Laboratory Review, Vol. 1, pp. 619-624.
- [48] Pradeel, A.K., et.al. 1988, "Crippled Motion in Robots," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 2-13.
- [49] Maciejewsky, A., 1990, "Fault Tolerance of Kinematically Redundant Manipulators," Proc. of IEEE Robotics and Automation Conf., pp. 638-642.
- [50] Lewis, C. and Maciejewsky, A., 1994, "Dexterity Optimization of Kinematically Redundant Manipulators in the Presence of Joint Failures," Computer Elect. Engng Vol. 20, No. 3, pp. 273-288.
- [51] Maciejewsky, A., 1994, "An Example of Failure Tolerant Operation of a Kinematically Redundant Manipulator," Proc. of IEEE Robotics and Automation Conf., pp. 1380-1387.
- [52] Kang, H.J., and Freeman, R.A., 1992, "Joint Torque Optimization of Redundant Manipulators via the Null Space Damping Method," Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice France.
- [53] Paredis, C.J.J., Au, W.K.F., and Khosla, P., "Kinematic Design of Fault Tolerant Manipulators," Computer Elect. Eng. Vol. 20, No. 3, pp. 211-220.
- [54] Paredis, C.J.J. and Khosla, P., 1994, "Mapping Tasks into Fault Tolerant Manipulators," Proc. of IEEE Robotics and Automation Conf., pp. 696-703.
- [55] Strang, G., 1980, Linear Algebra and Its Applications, 1st ed., Harcourt Brace Jovanovict, Publishers, San Diego.
- [56] Gerald, C.F., 1978, "Applied Numerical Analysis," Addison-Wesley, Reading, MA.
- [57] Freyermuth, B., 1991, "An Approach to Model

Based Fault Diagnosis of Industrial Robots," Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, CA.

- [58] Yi, B.J. Tesar, D., and Freeman, R.A., 1992, "Force and Stiffness Transmission of Redundantly Actuated Mechanisms: The Case of a Spherical Shoulder Mechanism," Proc. of the ASME Biennial Mechanisms Conf., Scottsdale, AZ.
- [59] Nahon, M.A., and Angeles, J., 1991, "Reducing the Effects of Shocks Using Redundant Actuation," Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, CA, pp238-243.
- [60] Dahl, O., and Neilsen, L., 1990, "Torque-Limited Path Following by On-Line Trajectory Time

Scaling," IEEE Tran. on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 5, pp. 554-561.

- [61] Arai, H., and Tachi, S., 1991, "Dynamic Control of a Manipulator with Passive Joints in an Operational Coordinate Space," Proc. of the 1991 IEEE Int. conf. on Robotics and Automation, Sacramento, CA.
- [62] 박종훈, 정완균, 염영일, "여유자유도 매니플레이터의 동력학 특성과 동력학적 제어기의 설계에 관하여," '95대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 902-907.
- [63] Shin, Kyu-Shik, 1993, "Construction and Testing of an Actuator Module," Presented at DOE/NE Robotics for Advanced Reactors Student Conference.

저 자 소 개



신 규 식

1983년 한양대학교 기계공학과 졸업하고 1990년과 1995년에 각각 University of Texas at Austin 기계공학과에서 석사와 박사학위를 취득하였습니다. 현재 삼성 데이터 시스템의 CAD/CAM팀에서 Computer Aided Engineering(CAE) 분야의 일을

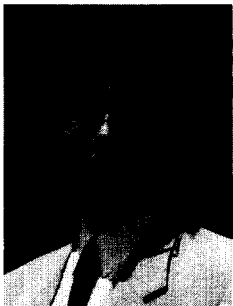
담당하고 있음. 관심연구분야는 Dual Actuator Design, Fault Tolerance Control, Modular Robot Design, Symbolic Finite Element Method등임. 삼성데이터 시스템주식회사 CAD/CAM팀
(120-020) 서울시 서대문구 미군동 219-1 임광빌딩
TEL. 02) 360-6148 / FAX. 02) 360-5600



김 회 국

1980년에 고려대학교 기계공학과를 졸업하였습니다. 1985년과 1990년에 각각 미국 오스틴 소재 텍사스 주립대학 기계공학과에서 석사 및 박사학위를 취득하였으며 그 후 일년동안 동대학에서 Post. Doc.으로 있었음. 1991년부터 현재까지 고려대학교 제어계측

공학과에 재직중이며 현재 직위는 부교수임. 주요관심 연구분야로는 로봇 공학(여유자유도/잉여구동 로봇시스템, 로봇 메카니즘 설계 및 해석, 로봇 말단효과장치, 원격로봇시스템, 모빌로봇/보행로봇), 시스템 제어(H_∞ 제어, Fuzzy 제어), 마이크로 프로세서 응용시스템등이 있음.
(339-800) 충남 연기군 조치원읍 서창동 208 고려대학교 제어계측공학과
TEL. 0415) 60-1443 / FAX. 0415) 865-1820



이 병 주

1984년 한양대학교 기계공학과 졸업 하였습니다.

1986년과 1991년에 각각 미국 오스틴 소재 텍사스 주립대학 기계공학과 석사 및 박사 학위를 취득하였고 그 후 8개월동안 동대학에서 Post. Doc.으로 있었음. 1992년 9월부터 한국기술교육대학교 제어기계공학과에 재직하였으며 1995년 3월부터 현재까지 한양대학교 제어계측공학과에 조교수로 근무하고 있음.

주요관심 연구분야로는 Multiple Arm Dynamics and Control, Biomechanical System Modeling and Analysis, Fault Tolerant Manipulator Architecture, Assembly Device Design, Dynamic System Animation 등이 있음.

(425-791) 경기도 안산시 사1동 1271