(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년04월04일
(11) 등록번호 10-1719380
(24) 등록일자 2017년03월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F16F 15/02 (2006.01) *F16F 15/00* (2006.01)
G01H 1/12 (2006.01) *G05D 19/02* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2011-7029760
(22) 출원일자(국제) 2010년06월11일
심사청구일자 2015년05월22일
(85) 번역문제출일자 2011년12월12일
(65) 공개번호 10-2012-0028917
(43) 공개일자 2012년03월23일
(86) 국제출원번호 PCT/NL2010/050360
(87) 국제공개번호 WO 2010/143959
국제공개일자 2010년12월16일
(30) 우선권주장
09162607.7 2009년06월12일
유럽특허청(EPO)(EP)
(56) 선행기술조사문헌
JP2007504415 A
WO2004029475 A1
EP0748951 A
US20020139988 A1

(73) 특허권자
메칼 비.브이.
네덜란드 7521 피엘 엔스헤데 캐피툴 15
(72) 발명자
린벨드, 니에크
네덜란드 엔엘-2517 이엘 덴 해그 그루트 헤르토기네란 102
반 덴 둘, 퇴니스 코넬리스
네덜란드 엔엘-2623 에이치에이치 델프트 가이스트라트 7
(74) 대리인
주봉진

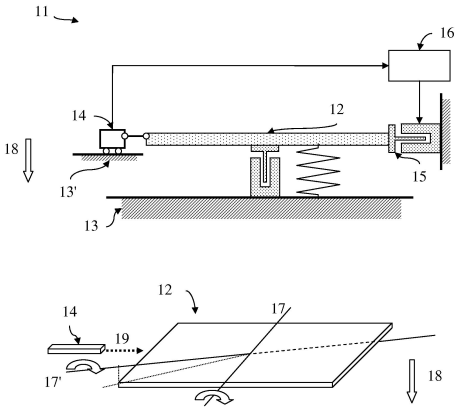
전체 청구항 수 : 총 7 항 심사관 : 원유철

(54) 발명의 명칭 **능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템**

(57) 요 약

본 발명은, 차단 또는 감쇠되어야 하는 페이로드, 상기 페이로드의 진동을 검출하기 위한 진동 센서, 상기 페이로드를 지지하는 베어링 바디(bearing body)에 대해 상기 페이로드를 이동시키는 액추에이터, 및 상기 액추에이터에게 진동을 표현하는 신호를 제공하는 컨트롤러를 포함하는, 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템에 관한 것이다. 본 발명은, 중력에 수직인 축에 대한 회전에 대해서는 페이로드와 낮은 스티프니스 결합(low stiffness connection)을 가지고 진동 센서에 의해 검출되는 진동에 대해서는 페이로드와 높은 스티프니스 결합(high stiffness connection)을 갖는 진동 센서를 적용함으로써 경사 문제(tilting problem)에 대한 해법을 제공한다.

대 표 도 - 도2



명 세 서

청구범위

청구항 1

능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템(11)에 있어서,

차단 또는 감쇠되어야 하는 페이로드(12);

상기 페이로드(12)를 지지하는 베어링 바디(bearing body)(13);

센서 프레임(sensor frame)을 포함하고 관성 기준 질량(inertial reference mass)을 가지며, 중력(18)에 수직인 측정 방향(19)에 대해 상기 페이로드(12)의 진동을 검출하는 진동 센서(14);

상기 페이로드를 지지하는 베어링 바디(13)에 대해 상기 페이로드를 이동시키는 액추에이터(15);

상기 진동 센서(14) 및 상기 액추에이터(15)에 대해 작동가능하게 연결되며, 상기 페이로드에서 검출된 진동을 표현하는 신호를 상기 액추에이터에게 제공하는 컨트롤러(16); 및

상기 진동 센서(14)와 상기 페이로드(12) 사이의 결합부(connection)를 포함하고,

상기 진동 센서와 상기 페이로드 사이의 결합부는 중력(18) 방향에 수직인 틸팅 축(tilting axis)(17)에 대한 회전에 대해 상대적으로 낮은 스티프니스(low stiffness)를 가져 상기 진동 센서가 상기 틸팅 축(17)에 대한 상기 페이로드의 진동에 대해 영향을 받지 않도록 하며,

상기 진동 센서와 상기 페이로드 사이의 결합부는 상기 진동 센서에 의해 검출될 수 있는 진동에 대한 측정 방향(19)에 대해 상대적으로 높은 스티프니스(high stiffness)를 가져 상기 진동 센서가 상기 측정 방향(19)에 대해 상기 페이로드의 진동을 따르며 측정할 수 있도록 하는 것을 특징으로 하는 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 진동 센서와 프레임(13') 사이의 결합부를 더 포함하고,

상기 진동 센서와 상기 프레임(13') 사이의 결합부는 상기 틸팅 축(17)에 대한 회전에 대해 상대적으로 높은 스티프니스를 가져 상기 페이로드(2)가 틸팅 축(17)에 대해 움직일 때 상기 틸팅 축(17)에 대한 상기 진동 센서(14)의 움직임을 방지하면서 상기 측정 방향(19)에 대한 상기 진동 센서(14)의 움직임은 허용하는 것을 특징으로 하는 시스템.

청구항 3

삭제

청구항 4

삭제

청구항 5

제2항에 있어서,

상기 진동 센서와 상기 프레임(13') 사이의 결합부는

센서(53)에 대해 제1 회전 스티프니스(rotational stiffness)를 가지고 상기 베어링 바디(13)에 대해 제2 회전 스티프니스를 가지며 결합된 보조 질량체(auxiliary mass)(57)를 포함하는 것을 특징으로 하는 시스템.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 시스템은 진동을 검출하기 위한 적어도 하나의 추가적인 진동 센서(25)를 포함하는 것을 특징으로 하는 시스템.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 진동 센서(14)는 중력 방향에 수직인 진동을 측정하는데 적합하고, 상기 추가적인 진동 센서(25)는 중력 방향의 진동을 측정하는데 적합한 것을 특징으로 하는 시스템.

청구항 8

삭제

청구항 9

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 액추에이터(15)는 로렌츠 액추에이터(Lorentz actuator)인 것을 특징으로 하는 시스템.

청구항 10

제1항 또는 제2항에 있어서,

3개의 수평 진동 센서와 3개의 수직 진동 센서를 포함하는 것을 특징으로 하는 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은, 차단 또는 감쇠되어야 하는 페이로드, 상기 페이로드의 진동을 검출하기 위한 진동 센서, 상기 페이로드를 지지하는 베어링 바디(bearing body)에 대해 상기 페이로드를 이동시키는 액추에이터, 및 상기 액추에이터에게 진동을 표현하는 신호를 제공하는 컨트롤러를 포함하는, 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 지진(earth vibrations) 및 기타 기계적 요동(mechanical disturbances)은 점점더 이러한 방해가되는 진동으로부터 자유로운 환경을 요구하는 장치들에 대한 제한 인자(limiting factor)가 되고 있다. 지구에서 개발되고 있는 우주 장비는 우주에서의 작동 환경과 유사한 테스트 환경을 요구한다. 프로세서나 메모리 등과 같은 반도체 생산품에 대해서 예견되는 바와 같이, 그 크기를 더욱 감소시키기 위하여는 이러한 반도체 생산물을 제조하기 위하여 사용되는 리소그래피 장비(lithographic equipment)가 현재 보다 더욱 안정화되어야 한다. 또한, 전자 및 원자 현미경의 해상도를 향상시키기 위하여는 진동을 제거하여야 한다. 기계적 스프링(mechanical spring), 엘라스토머(elastomer), 에어 베어링(air bearing), 또는 자기 베어링(magnetic bearing)을 이용하여 플랫폼(platform)이나 페이로드(payload)와 그 위에 놓여진 로드(load)를 진동으로부터 차단하기 위한 단순한 수동형 방법은 현재의 요구를 만족시키지 못한다.

[0003] 진동 측정에 근거하는 능동형 제어는, 진동 소스(예, 바닥)와 페이로드 사이의 스티프니스 커플링(stiffness coupling)만을 조절하는 (수동형 또는 능동형) 차단 기술에서 컴플라이언스(compliance)를 증가시키지 않고, 원하지 않는 진동을 수동형보다 더 잘 차단할 수 있다. 능동형 진동 차단 시스템은 실제의 기계적 요동을 보상한다. 원하지 않는 진동을 검출할 수 있는 센서가 진동 소스(종종 지면이나 바닥) 또는 페이로드(이는 지진이나 기타 기계적 요동으로부터 차단되어야 함)에 설치될 수 있다. 바닥이나 지지 구조체에 대한 페이로드의 진동 또는 관성 기준 질량(inertial reference mass)에 대한 페이로드의 진동은 기계적으로, 전기적으로, 광학적으로 또는 전자기적으로 검출될 수 있다. 이를 위하여, 센서는 가속도, 속도, 위치, 거리 등을 검출하는 공지의 수단을 포함할 수 있다. 페이로드는 스프링(spring) 또는 기타 베어링(bearing)에 의해 지지되고, 센서의 검출축(sensitive axis)을 따라서 서보모터(servomotor)와 같은 액추에이터(actuator)에 의해 구동될 수 있다. 센서의 전기적 출력은 (필터링되고) 피드백되어 원하지 않는 진동을 보상하기 위한 액추에이터로 전송된다.

[0004] 국제 특허 출원 WO 2004/029475호는 능동형 진동 차단 및 제거 시스템과 방법(A system and method for active

vibration isolation and cancellation)을 개시한다. 진동 센서는 페이로드에 탄력성있게(compliantly) 부착된 관성 기준 질량에 대해 소정의 방향에서 페이로드의 진동을 측정한다. 측정된 진동 신호는 그 방향에서 인가되어야 하는 힘을 계산하는 컨트롤러로 전송된다. 사용되는 센서는, 그 방향에서 진동을 검출하기 위하여, 통상적으로 하나의 방향에 대해 컴플라이언스(compliance)(높은 스티프니스((high stiffness))를 나타낸다. 보다 구체적으로, 센서는 하나의 병진 자유도(translational degree of freedom)를 가질 수 있다. 유럽 특허 공개 EP 1 870 614 A1는 센서와 액추에이터를 포함하고 센서의 유효축(effective axis)과 액추에이터의 유효축이 본질적으로 평행한 능동형 진동 차단 시스템을 개시한다. 하나 이상의 자유도에 대하여 진동을 차단하기 위하여 몇 개의 센서 및 액추에이터 조합이 사용될 수 있음은 당업자들에게 공지된 사실이다.

[0005] 작은 진폭에 대해서도 진동을 잘 차단하기 위하여, 진동 센서는 차단되어야 하는 페이로드 상에 위치하거나 또는 페이로드에 고정되는 것이 바람직하다. 보다 구체적으로, 관성 기준 질량을 포함하는, 절대 진동 센서(absolute vibration sensor)가 적용된 능동형 진동 시스템은 저주파수에서도 진동을 잘 차단한다. 기준 질량은 센서 프레임과 결합되어 있다. 센서 프레임에 대한 질량의 변위(displacement)는 하나의 병진 자유도에 대해 기록될 수 있다. 센서 프레임에 대한 스티프니스 커플링(stiffness coupling)을 통하는 경우를 제외하고, 만약 동적인 힘이 측정 방향에서 기준 질량에 직접적으로 가해지지 않는다면, 기록된 신호는 이 방향에서 센서 프레임의 절대 진동의 측정값이 된다. 센서 프레임과 페이로드 사이의 모든 자유도에서 높은 스티프니스 커플링(high stiffness coupling)으로 인하여, 센서는 페이로드와 동일한 방식으로 이동하고 회전한다.

[0006] 진동 센서가 수평 자유도(horizontal degree of freedom)의 진동을 측정하는 경우, 중력(또는 중력 벡터)은 측정 방향에 대해 수직이다. 이는 추가적인 자유도가 없기 때문에 센서는 이러한 수직력에 민감하게(sensitive) 반응하지 않는다는 것을 의미한다. 센서가 관성 기준 질량을 포함하는 경우, 상기 질량에 대해 측정 방향(즉, 수평 방향)에서 중력에 기인한 변위는 발생되지 않는다. 센서(더 구체적으로는 센서 하우징)와 페이로드 사이의 스티프니스 커플링으로 인해 발생되는 문제점은 "수평 경사 문제(horizontal tilting problem)"로 불리는데, 이는 주로 페이로드 및 그에 따른 센서가 수평축을 따라서 회전 진동을 나타낼 때 발생하기 때문이다.

[0007] 페이로드가 수평축에 대해 경사지게 되면, 측정 방향도 동일한 방식으로 경사지게 된다. 경사진 배향(tilted orientation)의 경우, 기준 질량에 대해 중력에 기인한 측정 방향에서의 변위(displacement)가 일어나게 된다. 이는, 페이로드가 수평축에 대해 경사져 있는 자유도에 대해, 수평 방향에서 측정된 진동은 더 이상 절대 진동으로서 유효하지 않다는 것을 의미한다. 경사진 방향에서 페이로드에 인가되는 요동(disturbances)은 다른 수평 방향에서 잘못된 진동 신호를 초래하게 되고, 이는 그 방향에서 진동 차단의 성능을 감소시킨다.

[0008] 국제 특허 출원 WO 2005/047728호는 낮은 수평 고유 주파수(low horizontal natural frequencies)에 도달할 수 있는 수평 움직임 진동 차단 시스템을 개시한다. 본 시스템의 베어링 부재(bearing members (columns))는 페이로드와 프레임 사이에 구비되는 단단한 부재(rigid members)로서, 이는 수평축에 대한 경사 회전에 대한 스티프니스를 가지며 페이로드의 수평 이동을 허용하는 경사 메커니즘(tilt mechanisms)을 포함한다. 상기 국제 특허 출원은 하나의 자유도를 갖는 스프링-질량 시스템(spring-mass system)을 개시하는데, 이는 소정 주파수 이상에서 페이로드와 프레임 사이의 진동을 감소시킬 수 있는 시스템이다. 수동형 시스템은, 예컨대 페이로드의 베어링 부재들 중 하나 가까이에 질량(mass)이 위치하기 때문에, 페이로드의 경사를 수동적으로 방지한다. 이는 능동형 진동 차단 시스템에서 얻을 수 있는 수준의 진동 차단을 제공하지 못한다.

[0009] 페이로드의 경사를 측정하는 센서들은 공지되어 있다. 예컨대, J. Winterflood, Z.B. Zhou, L. Lu 및 D.G. Blair의 "Tilt suppression for ultra-low residual motion vibration isolation in gravitational wave detection"(Physics Letter A 277 (2000) pp. 143-155)에 복잡한 센서가 개시되어 있다. 상기 공간적으로 설계된 센서는 미러 표면(mirrored surfaces) 사이에서 반사되어 4분할 포토다이오드(quadrant photo-diode)로 전송되는 레이저 빔(laser beam)을 포함한다. 상기 센서는 능동형 진동 시스템에 적용될 수 있지만, 상대적으로 간단한 해법(solution)을 제공하지는 않는다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명의 목적은 페이로드 주위의 환경에서 유발되는 방해성 진동을 페이로드로부터 양호하게 차단할 수 있으며 또한 페이로드의 진동을 양호하게 감쇠시킬 수 있는 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0011] 본 발명의 상기 목적은, 중력에 수직인 축에 대한 회전에 대해서는 페이로드와 낮은 스티프니스 결합(low stiffness connection)을 가지고 진동 센서에 의해 검출되는 진동에 대해서는 페이로드와 높은 스티프니스 결합(high stiffness connection)을 갖는 진동 센서를 포함하는 시스템에 의해 이루어 질 수 있다.

발명의 효과

[0012] 중력에 수직인 축에 대한 회전에 대하여 페이로드와의 낮은 스티프니스 결합(low stiffness connection)의 효과는, 페이로드의 경사가 측정 방향에서 진동 센서에 대해 추가적인 힘을 초래하지 않는다는 것이다. 그러므로, 센서는 경사진 진동(tilting vibration)에 대해 실질적으로 디커플링(decoupling)된다. 종래기술에 따른 능동형 진동 시스템의 경우, 추가적인 힘은 회전과는 상이한 자유도를 갖는 진동으로 해석될 수 있다. 예컨대 수평 진동을 측정하도록 설계된 진동 센서를 포함하는 능동형 진동 차단 시스템의 경우, 경사진 진동은 페이로드의 수평 진동으로 잘못 해석될 수 있다. 그 결과, 종래기술에 따른 시스템의 컨트롤러는 페이로드를 수평적으로 이동시키기 위한 신호를 수평 액추에이터에게 전송하게 된다. 본 발명에 따른 디커플링은 이러한 잘못된 이동을 방지할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0013] 도 1은 종래기술에 따른 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템의 개요도이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템의 개요도로서, 대부분의 자유도에 대하여 페이로드를 지지하는 프레임에 고정된 하나의 진동 센서를 구비하는 것을 도시하고 있다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템의 개요도로서, 대부분의 자유도에 대하여 페이로드에 고정된 하나의 진동 센서를 구비하는 것을 도시하고 있다.

도 4는 수평 진동에 대한 본 발명의 특별한 관련성을 설명하는 도면이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템의 개요도로서, 추가적인 센서를 구비하는 것을 도시하고 있다.

도 6은 도 5의 실시예의 성능을 나타낸 것으로, 센서에 대한 액추에이터의 개루프 전달 함수에 대한 모델 계산(model calculations)을 보여준다.

도 7은 도 5의 실시예의 성능을 나타낸 것으로, 페이로드의 중력 중심의 움직임(motion)에 대한 간섭력(disturbance forces)의 폐루프 전달 함수에 대한 모델 계산을 보여준다.

도 8은 높은 회전 스티프니스(high rotational stiffness)를 구현하기 위한 일 실시예의 개요도이다.

도 9는 저주파수 및 고주파수에서 서로 다른 회전 스티프니스를 갖는 일 실시예의 개요도이다.

도 10은 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템에서 센서들과 액추에이터들의 배향에 대한 일 실시예를 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0014] 본 발명은 관련 진동 센서의 움직임이 페이로드의 움직임과 적어도 부분적으로 디커플링(decoupling)될 때 공지의 능동형 진동 차단 시스템의 추가적인 개선이 가능하다는 통찰에 근거한다.

[0015] 소정의 자유도에 대하여 진동 센서의 높은 스티프니스 결합(high stiffness connection)은, 센서가 특정 자유도에서 페이로드(payload), 프레임(frame), 베어링 바디(bearing body), 또는 그라운드(ground)의 진동을 대체적으로 검출하거나 또는 측정하는 것을 의미한다. 예컨대, 수평 방향에서 높은 스티프니스 결합은, 센서가 소정 범위의 주파수에서 센서가 정밀하게 고정되어 있는 베어링(bearing)의 수평 변위를 검출하거나 또는 측정하는 것을 의미한다. 통상적으로, 높은 스티프니스 결합은 25 Hz 이상의 공진 주파수(resonance frequency)를 초래한다.

[0016] 소정의 자유도에 대하여 진동 센서의 낮은 스티프니스 결합(low stiffness connection)은, 센서가 특정 자유도에서 페이로드, 프레임, 베어링 바디, 또는 그라운드의 진동에 대해 대체로 독립적이라는 것을 의미한다. 예컨대, 축에 대한 회전에 대해 낮은 스티프니스 결합은, 센서가 소정 범위의 주파수에서 회전을 측정하지 않거나 또는 회전을 아주 미세하게 검출하거나 측정하는 것을 의미한다. 통상적으로, 낮은 스티프니스 결합은 높은 스

티프니스 결합보다 10배 낮은 인자(factor)이다.

[0017] 도 1은 종래기술에 따른 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템의 개요도이다. 상기 시스템은 차단 또는 감쇠되어야 하는 페이로드(payload)(2), 상기 페이로드를 지지하는 베어링 바디(bearing body)(3, 3'), 상기 페이로드이 진동을 검출하기 위한 적어도 하나의 진동 센서(vibraation sensor)(4 또는 4'), 상기 페이로드를 이동시키기 위한 적어도 하나의 액추에이터(actuator)(5 또는 5'), 및 상기 액추에이터에게 (병진 방향 또는 회전 방향의) 관련 자유도(degree of freedom)를 갖는 진동을 표현하는 신호를 제공하기 위한 컨트롤러(6 또는 6')를 포함한다. 진동 센서(4')는 페이로드(2) 상에 위치하거나 또는 고정될 수 있으며, 또는 베어링 바디와 페이로드의 상대적 거리를 측정하기 위해 진동 센서(4)는 베어링 바디(3) 상에 위치하거나 또는 고정될 수 있다. 페이로드는 기계적 스프링이나 엘라스토머(elastomer)와 같은 전형적인 서스펜션(suspension)(7)에 의해 지지될 수도 있다. 베어링 바디(bearing body)는, 프레임(frame), 바닥(floor), 벽(wall) 또는 천장(ceiling)을 포함하는, 페이로드를 위한 어떠한 지지 구조체가 될 수 있다. 액추에이터는 베어링 바디 상에 위치하거나 또는 베어링 바디에 고정된다. 상기 액추에이터는 예컨대 피에조세라믹(piezoceramic) 형태의 압전 액추에이터(piezo-electric actuator), 자기변형 모터(magnetostrictive motor), 로렌츠 모터(Lorentz motor)(보이스 코일(voice coil)) 또는 다른 형태의 위치지정 액추에이터(position actuator)나 모터가 될 수 있다.

[0018] 도 2는, 수평 진동이 차단 또는 감쇠되는, 본 발명의 일 실시예에 따른 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템의 개요도이다. 진동 센서(14)는 수평 방향에서의 병진 운동을 제외하고 모든 자유도에 대해 프레임(13')에 고정된다. 상기 프레임은 페이로드를 지지하는 프레임(13)이 될 수 있다. 진동 센서는 페이로드의 수평 이동을 측정하기 위해 상기 페이로드에 단단하게 결합된다. 수평 진동을 표현하는 신호는 컨트롤러(16)로 전송된다. 방해적인 틸팅 축(disturbing tilting vibration axis)(17, 17')이 센서(14)의 측정 방향(19)에 수직인 성분을 갖는 경우, 이는 진동 센서가 하나의 자유도에서만 진동을 측정할 때 만족된다. 도면에서 축(17)으로 도시된 바와 같이 비록 상기 틸팅 축이 측정 방향에 수직이고 페이로드의 평면 내에 놓이더라도, 예컨대 축(17')와 같이 중력(18) 방향에 수직인 성분을 갖는 축에 대한 어떠한 회전은 축(17)에 대한 회전을 초래한다. 도면에서는 단지 하나의 진동 센서만을 도시하였다. 그러나, 경사가 다른 방향에서도 일어날 수 있는 경우에는, 2개 또는 3개의 진동 센서가 바람직하다. 수평 진동은, 컨트롤러(16)로부터 입력 신호를 수신하는 적어도 하나의 액추에이터(15)에 의해 감쇠된다.

[0019] 나머지 자유도에 있어서의 진동은 본 발명의 기술분야에서 공지되어 있는 진동 센서에 의해 측정될 수 있다. 이러한 센서는 페이로드의 표면에 위치하는 것이 바람직하지만, 물론 페이로드를 지지하는 바닥의 표면에 위치할 수도 있다. 그러므로, 수평 진동 센서는 예컨대 이중 힌지(double hinge)나 유연성 빔(flexible beam)을 통해서 단지 그 측정 방향에 있어서만 페이로드와 결합될 수 있다. 상기 진동 센서의 다른 5개의 자유도는 선형 안내기(linear guidance)를 통해 그라운드(ground)에 단단하게 결합된다. 상기 선형 안내기는, 페이로드가 경사지게 될 때 진동 센서도 경사지게 되어, 측정 방향에서는 진동 센서 프레임의 움직임을 허용하면서도 다른 방향에서는 진동 센서 프레임의 움직임을 허용하지 않도록 설계될 수 있다.

[0020] 도 3은 본 발명의 다른 실시예에 따른 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템의 개요도로서, 이는 5개 미만의 자유도에 대해 페이로드와 높은 스티프니스 결합을 갖는 제1 진동 센서(24)를 포함하며 수평 진동을 측정하도록 설계되어 있다. 상기 제1 진동 센서는 페이로도의 경사와는 디커플링된다. 페이로드의 수평 진동을 표현하는 신호는 수평 액추에이터(15)의 변위(displacement)를 제어하는 컨트롤러(16)로 전송된다. 상기 시스템은 또 다른 자유도에 있어서 진동을 측정하도록(예컨대 수직 진동을 측정하도록) 설계된 제2 진동 센서(25)를 더 포함할 수 있다. 상기 제2 진동 센서는 경사 진동(tilting vibration)과 디커플링될 필요는 없다. 페이로드의 수직 진동을 표현하는 신호는 수직 액추에이터(27)의 변위를 제어하는 컨트롤러(26)로 전송된다. 2개의 컨트롤러는 서로 다른 액추에이터의 변위를 제어하기 위하여 하나의 전자 회로에 결합될 수 있다는 것을 알 것이다. 비록 진동 센서가 어떠한 형태가 되더라도, 관성 기준 질량(inertial reference mass)을 포함하는 진동 센서는 저주파수(예컨대, 0.2 Hz 이하의 주파수)를 갖는 진동에 대한 차단 및 감쇠 시스템에 바람직하다. 상기 센서에서, 기준 질량은 진동 센서로 검출할 수 있는 자유도에 대하여 센서 하우징(housing)과 낮은 스티프니스 결합을 갖는다. 센서의 하우징에 대한 낮은 스티프니스 결합으로 인하여, 기준 질량은 검출될 진동에 대하여 관성 질량이 된다.

[0021] 도 4는 수평 진동에 대한 본 발명의 특별한 관련성을 설명하는 도면이다. 수평 진동을 측정하기 위한 진동 센서가 α 크기의 각으로 경사져 있는 경우, 이러한 경사는 중력과 경사각 α의 사인(sine)값의 곱에 해당하는 추가적인 힘($F_{//} = F_g * \sin(\alpha)$)을 센서 축(수평 방향으로 가정함)에 대하여 초래한다. 경사각이 작은 경우, 이는 중력에 선형 비례하는 힘을 초래한다. 수직 진동 센서의 경우, 추가적인 힘은 경사각의 코사인(cosine)값

에 비례한다. 비록 동일한 효과가 발생하지만, 능동형 진동 차단에 대한 영향력(impact)은 크지 않다. 이러한 힘(이는 통상적으로 수평 진동보다 작은 크기의 차원(orders)을 가짐)은 작은 각(angle)에 대해서는 무시될 수 있는데, 대부분의 공통적인 요동의 경우 작은 각을 가진다.

[0022] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템의 개요도로서, 추가적인 센서를 구비하는 것을 도시하고 있다. 본 실시예와 관련하여, 본 발명에 따른 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템의 유리한 특성들이 설명될 것이다. 상기 실시예는 하나의 수직 방향과 하나의 수평 방향으로 움직일 수 있는 단단한 페이로드(31)를 포함하고, 이는 수직 및 수평 이동 모두에 수직인 축 주위로 회전할 수 있다. 상기 페이로드는 모든 자유도에 대해서(즉, 병진 및 회전 방향에 있어) 5 Hz 서스펜션(32)에 의해 단단한 세계(rigid world)와 결합된다. 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템은 중력 중심의 암(arm)에 위치하는 3개의 진동 센서를 포함한다. 2개의 진동 센서(34, 35)는 수직 진동을 검출할 수 있으며, 1개의 진동 센서(33)는 수평 진동을 검출할 수 있다. 3개의 진동 센서 모두는 그에 상응하는 액추에이터(36, 37, 38)와 동일한 방향에서 정렬되어 있으며, 이들 액추에이터는 페이로드에 대해 힘을 인가할 수 있다. 액추에이터는 하나 이상의 컨트롤러(39, 39', 39")에 의해 제어된다.

[0023] 도 6은 도 5의 실시예의 성능을 나타낸 것으로, 센서에 대한 액추에이터의 개루프 전달 함수(open loop transfer function)에 대한 모델 계산(model calculation)을 나타낸 그래프이다. 상기 모델 계산의 경우, 3개의 센서가 선형적으로 가이드되는 질량 스프링 시스템(linearly guided mass spring system)으로서 모델링되어 있다. 상기 모델에서, 관성 피드백 시스템(inertial feedback system)의 성능은 해당 센서와 액추에이터 사이의 제어 루프(control loop)을 닫음(closing)으로써 예측될 수 있다. 2가지 경우가 시뮬레이션되어 있다. 하나는 센서에 대한 중력 효과를 나타내는 종래기술에 따른 능동형 중력 시스템에 대한 것이고, 나머지 하나는 본 발명에 따른 능동형 중력 시스템에 대한 것이다. 후자의 경우 중력은 생략되었다.

[0024] 각각의 센서에 대한 각각의 액추에이터의 개루프 전달 함수가 나타나 있다. 실선은 중력 효과가 포함되어 있는 종래 기술에 따른 시스템의 상태를 나타내며, 점선은 중력 효과가 배제되어 있는 본 발명에 따른 시스템의 상태를 나타낸다. 수평 센서의 저주파수 영역에서, 중력이 있는 경우와 중력이 없는 경우 사이에 명백한 차이가 존재한다. 중력이 있는 경우, 크로스오버 주파수(crossover frequency) 주위에서 위상(phase)과 결합하는 저주파수 이득(low frequency gain)은 획득가능한 루프 이득(loop gain)에 제한(limit)을 초래한다. 상기 실시예의 경우, 중력 효과가 포함되어 있을 때 최대 획득가능한 루프 이득은 약 35 dB이다. 상기 모델에서, 중력 효과가 배제되어 있을 때 최대 획득가능한 루프 이득은 제한되지 않는다. 실제로 이는 센서 노이즈(sensor noise) 및/또는 보다 높은 공진(higher resonances)에 의해서만 제한된다.

[0025] 도 7은 도 5의 실시예의 성능을 나타낸 것으로, 페이로드의 중력 중심의 움직임(motion)에 대한 간섭력(disturbance forces)의 폐루프 전달 함수에 대한 모델 계산(model calculation)을 나타낸 그래프이다. 상기 모델 계산은 도 6에 도시된 것과 동일한 가정에 근거한다. 마찬가지로, 실선은 중력 효과가 포함되어 있는 종래 기술에 따른 시스템의 경우를 나타내며, 점선은 중력 효과가 배제되어 있는 본 발명에 따른 시스템의 경우를 나타낸다. 상기 실시예에서, 동일한 (중력 제한) 컨트롤러가 적용된다.

[0026] 2가지 경우에 있어 대각선 전달 함수(diagonal transfer function)는 비교할 만한다. 그러나, 수평축 근처의 모멘트(moment) M_{Θ}, 수직 방향에서의 힘 F_z, 및 수평 방향에서의 페이로드 움직임(motion) $X_{payload}$ 사이의 비 대각선 구간들(off-diagonal terms)에서, 컴플라이언스(compliance)의 극적인 증가(dramatic increase)가 관찰된다. 이는 상기 주파수 대역에서 모멘트(또는 질량 중심의 암(arm)에서의 힘)를 인가하는 경우, 중력 중심의 수평 움직임 구간에서 테이블(table)의 응답(response)은 수평 힘과 수평 움직임 사이의 실제 전달(transfer)보다 상당히 크다. 중력 효과가 배제되는 경우, 페이로드의 절대 동작의 구간에서 관성 피드백 시스템의 성능은 비대각선 구간들 중 하나에서 증가된 컴플라이언스에 의해 상당히 감소된다. 중력 효과가 없는 경우, 또는 제안된 해법(solution)을 적용함으로써, 저주파수 대역에서의 성능은 페이로드의 수동형 서스펜션(passive suspension)만큼 향상될 수 있다.

[0027] 도 8은 베어링 바디(예, 프레임)와 결합을 위하여 높은 회전 스티프니스(high rotational stiffness)를 구현하고 페이로드와 결합을 위하여 낮은 스티프니스(low stiffness)를 구현하기 위한 일 실시예의 개요도이다. 각각 프레임에 고정된 힌지(hinge)(54)를 구비하는 강체(rigid body)(51) 및 2개의 유연성 빔(flexible beam)(52, 52')을 포함하는 3개의 굴곡 메커니즘(flexure mechanisms)을 통해서, 수평 센서(horizontal sensor)(53)는 프레임에 대해 높은 회전 스티프니스 결합을 갖는다. 다른 자유도의 경우, 센서는 페이로드와 단단하게 연결된다. 회전축들은 페이로드(55)의 수평 변위를 검출하는 수평 진동 센서의 측정 방향 및 중력 벡터(56) 모

두에 대해 수직이다.

[0028] 감소된 저주파수 경사 효과(low frequency tilting effect)(즉, 프레임에 대한 센서의 단단한 결합)와 고주파수에서 프레임과 진동 센서 사이의 약한 커플링(coupling)을 결합하는 것이 바람직하다. 이러한 효과는 센서와 프레임 사이에 위치하는 보조 질량체(auxiliary mass)에 의해 얻어질 수 있다. 도 9에는 이러한 시스템의 일 실시예를 나타내었다. 상기 실시예에서, 힌지(54)는 프레임에 부착되지 않고 보조 질량체(57)에 부착된다. 보조 질량체(57)는 또한 프레임(13)에 결합된 회전 스티프니스(rotational stiffness)(58)와 결합된다. 그러나, 질량의 회전축은 센서(53)의 회전축과 평행하다. 보조 질량체의 회전 및 센서의 회전 사이의 커플링(|M|)이 롤오프(roll off)되는 주파수 f_{ro} 는 보조 질량체(통상 1 ~ 100 kg)와 2개의 회전 스티프니스에 의해서 조절될 수 있다. 통상적으로, 프레임에 대한 회전을 위한 보조 질량체의 회전 스티프니스는 적어도 보조 질량체에 대한 센서의 회전 스티프니스 보다 크다.

[0029] 도 10은 능동형 진동 차단 및 감쇠 시스템에서 센서들(61, 61', 61")과 액추에이터들(62, 62', 62")의 배향(orientation)에 대한 일 실시예를 도시한 것이다. 액추에이터는 페이로드(63)를 지탱하는 프레임(64)에 고정되거나 또는 그라운드(ground) 상에 위치한다. 하나 이상의 센서/액추에이터 조합을 포함하는 시스템에서, 센서와 액추에이터는 동일한 자유도를 가질 필요는 없다. 이는 센서의 측정 방향이 액추에이터의 변위 방향에 상응할 필요가 없다는 것을 의미한다. 센서(61")는 중력에 대한 고정 각(fixed angle)에 대해 심지어 경사질 수도 있다.

[0030] 본 발명은 특히 테스트 중인 기구(instruments)(예, 우주 장비들을 위한 기구)를 지원하기 위해 사용되는 플랫폼(platform)에 적합하다. 그러나, 본 발명은 또한 망원경, 리소그래픽 장치(lithographic machineries), 자동차 등과 같은 다양한 장비에서 진동 차단을 위해 사용될 수 있다. 본 시스템은 페이로드를 예컨대 지면으로부터 발생되는 외부 진동에 대해 차단하는데 적합하다. 또한, 본 시스템은 페이로드(예, 장비를 핸들링하는 사람이나 이동부(moving part)를 포함하는 장비) 자체에서 발생되는 진동을 감쇠하는데 적합하다. 여기서 진동은 움직임, 변위, 회전 등과 같은 모든 형태를 포함하는 의미이며, 주기적이든 비주기적이든 상관없다. 그리고, 본 발명은 자체 환경에서 발생되는 진동으로부터 페이로드를 차단(isolating)시키기 위한 것이며, 또한 페이로드에 놓여진 장비와 같이 다른 소스(other sources)에서 발생되는 진동을 상쇄(counteracting)시키기 위한 것이다.

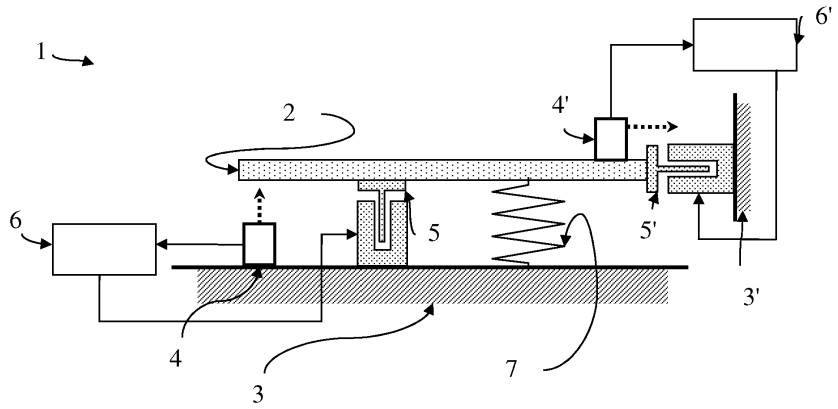
[0031] 능동형 진동 차단 시스템은 차단 또는 감쇠되어야 하는 페이로드의 진동을 검출하기 위하여 적어도 하나의 센서를 포함한다. 센서는 모든 공간적 방향(spatial directions)에 대해 진동을 검출할 필요는 없다. 실제에서는, 한정된 수(예, 하나 또는 둘)의 자유도를 갖는 센서를 사용하는 것이 바람직하다.

[0032] 본 명세서에서 사용된 용어들은 본 발명의 범위를 제한하도록 해석되어서는 안된다. 특히, "포함하다(comprise(s))"와 "포함하는(comprising)"은 구체적으로 언급되지 않은 어떠한 구성요소를 배제하는 것이 아니다. 하나의 구성요소는 다양한 구성요소 또는 그 등가물로 대체될 수 있다.

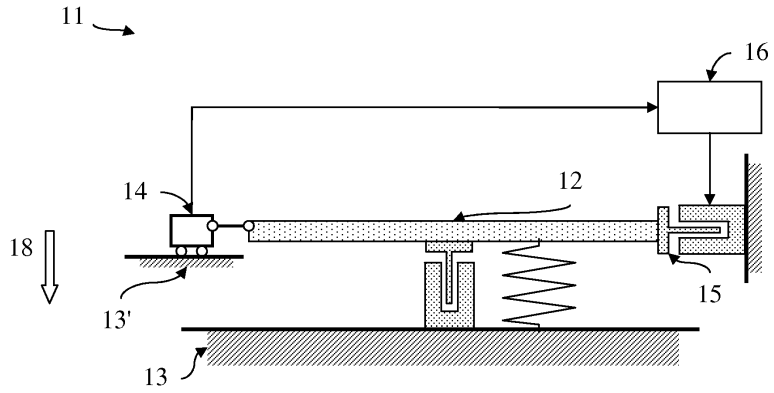
[0033] 본 발명의 기술분야의 당업자는 본 발명이 전술한 실시예에 제한되지 않는다는 것을 알 것이며, 또한 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 많은 다양한 변형예나 추가예가 가능하다는 것을 알 것이다.

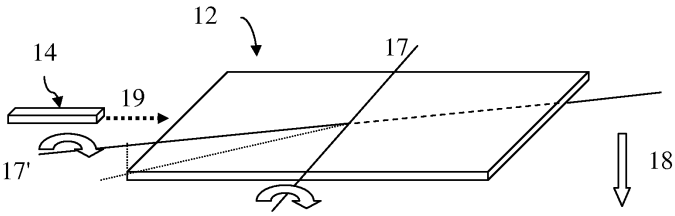
도면

도면1

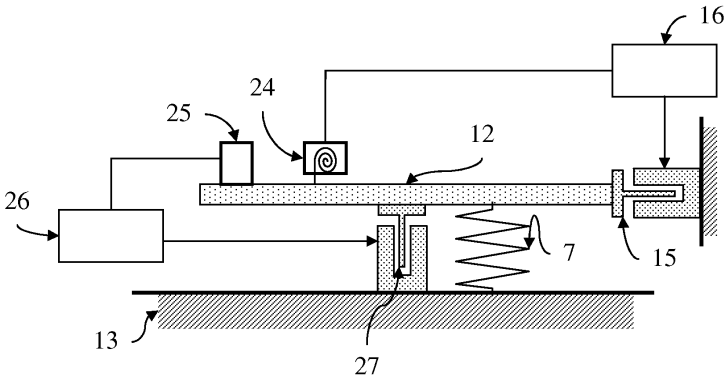


도면2

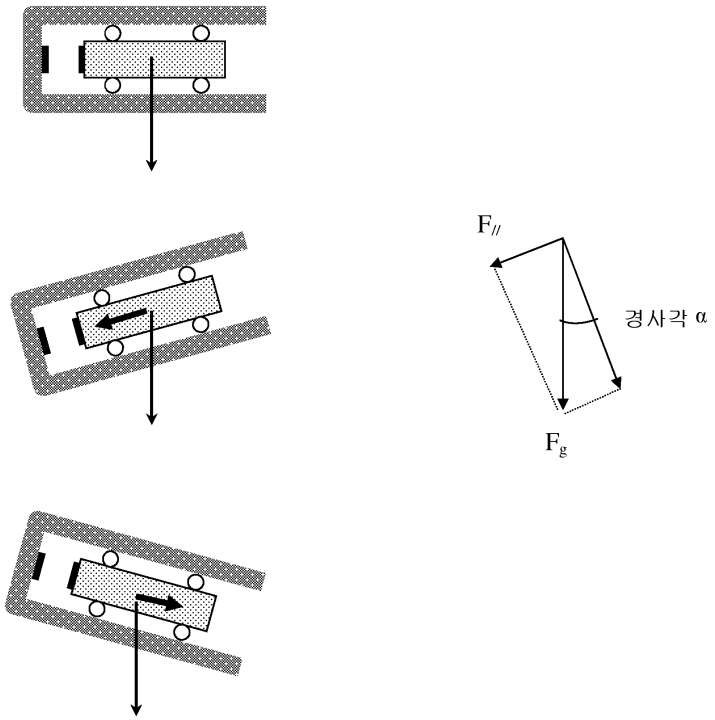




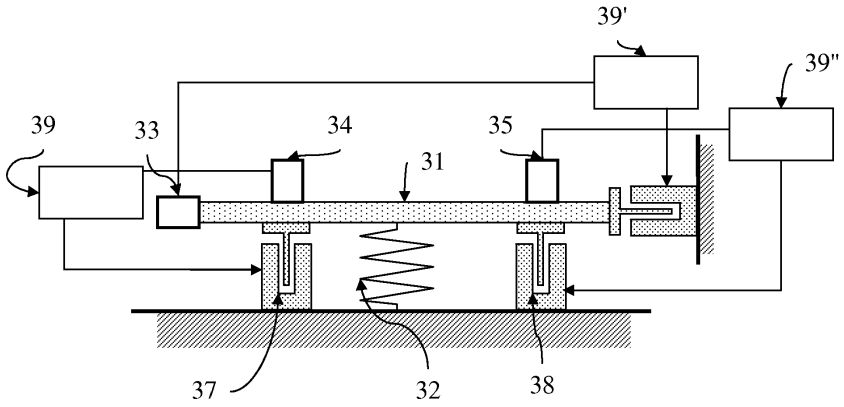
도면3



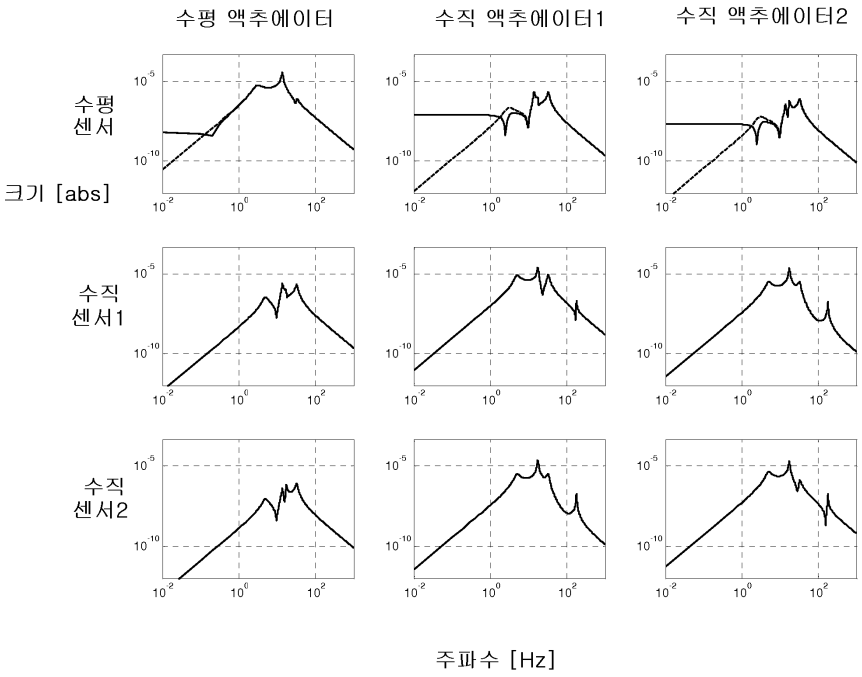
도면4



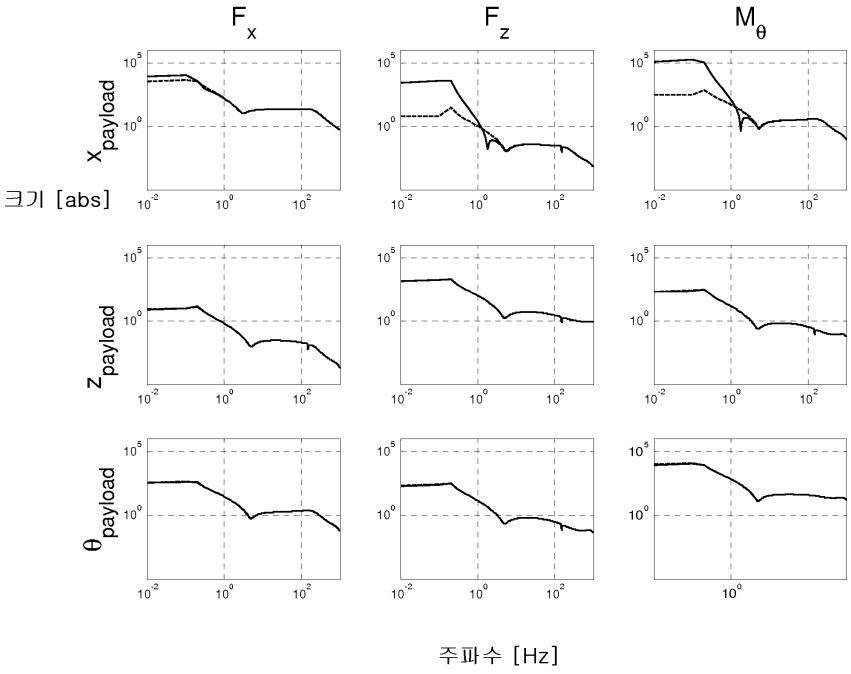
도면5


39'
39"
39
33
34
35
31
37
32
38

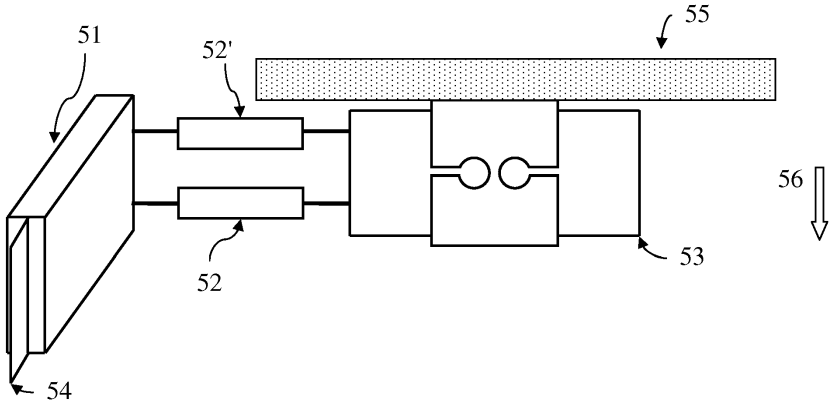
도면6


수평 액추에이터
수직 액추에이터1
수직 액추에이터2
수평 센서
수직 센서1
수직 센서2
크기 [abs]
주파수 [Hz]

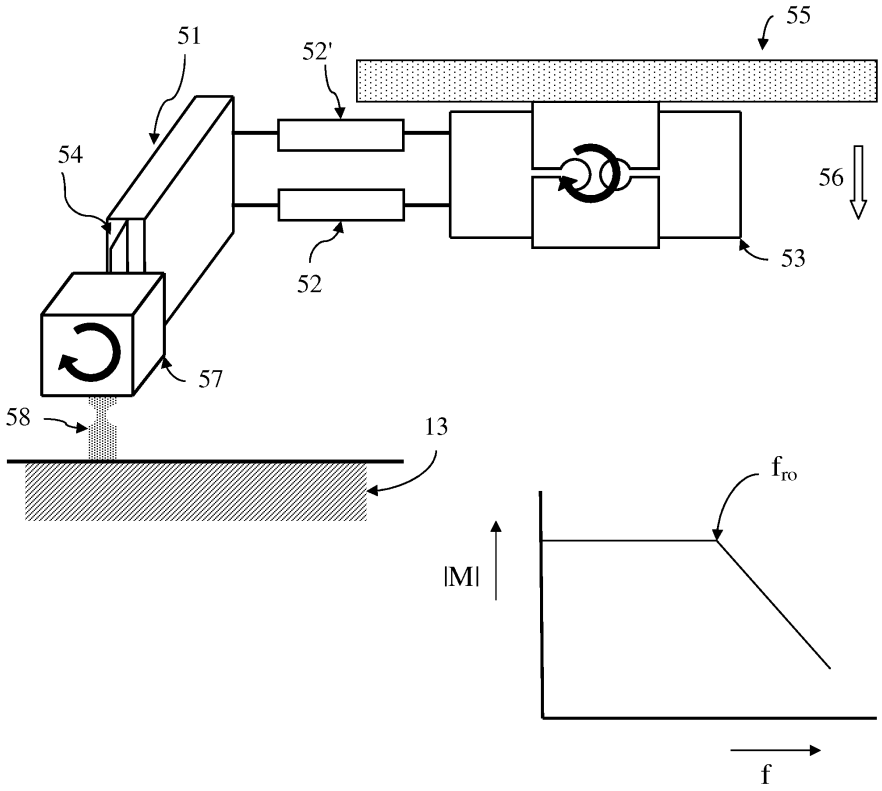
도면7


F_x
F_z
M_θ
X_payload
Z_payload
θ_payload
크기 [abs]
주파수 [Hz]

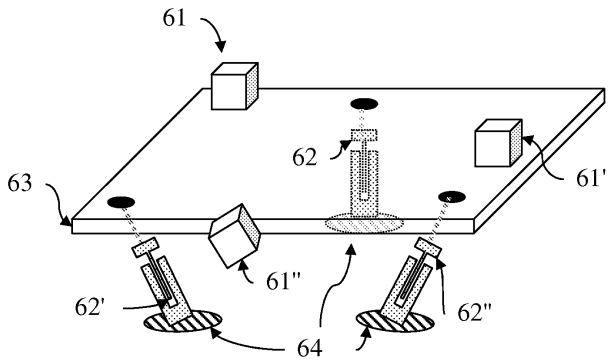
도면8


51
52'
55
56
53
52
54

도면9



도면10



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 7

【변경전】

상기 진동 센서(24)

【변경후】

상기 진동 센서(14)