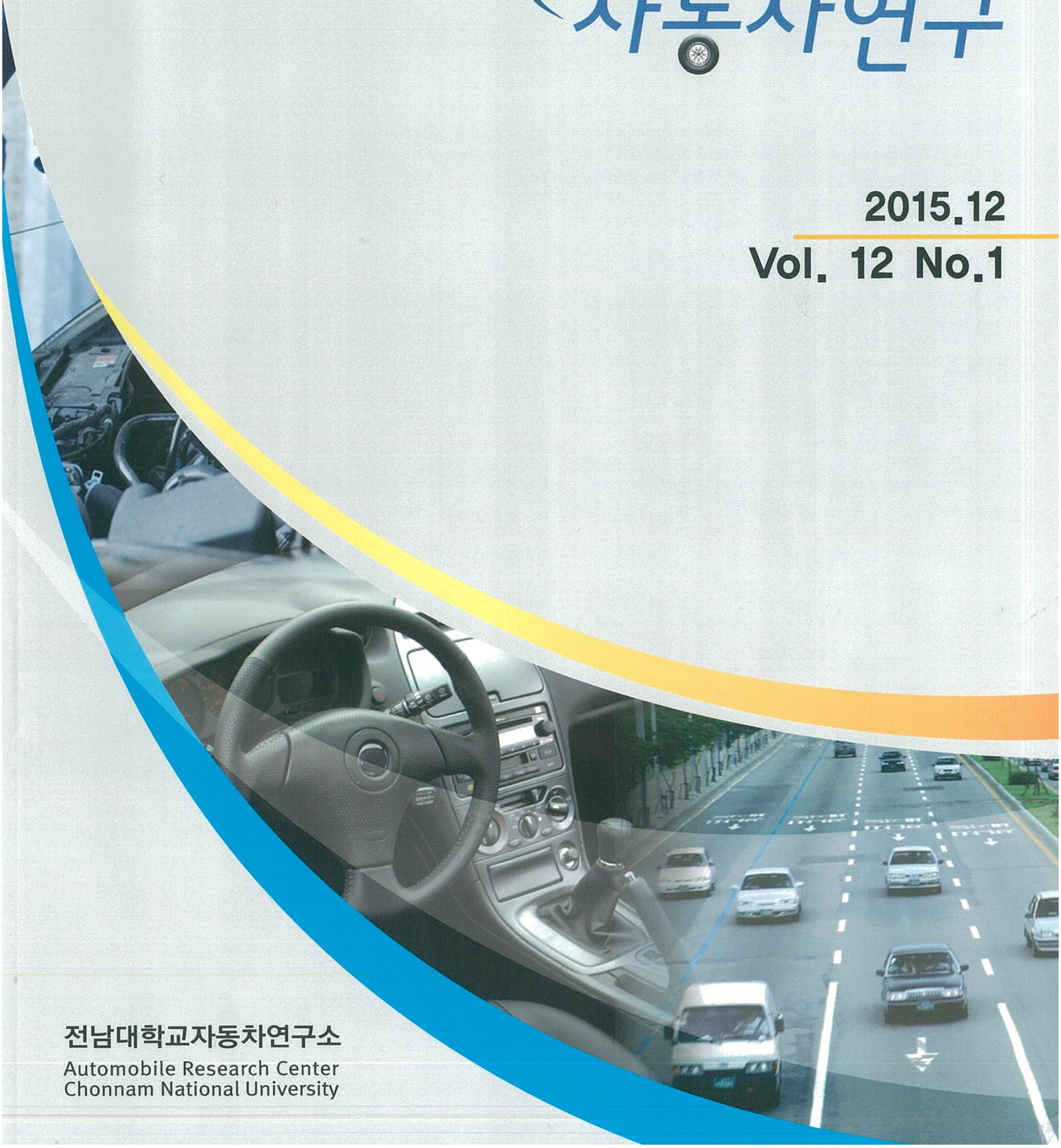
Paper411

Automobile Research

자동차연구

2015.12

Vol. 12 No.1



전남대학교자동차연구소
Automobile Research Center
Chonnam National University

CONTENTS

Technical paper

Automobile Research
Vol. 12, No. 1(2015), pp. 27~37
Chonnam Nat. Univ., Korea

대형 케이블기반 병렬형 로봇의 적용 및 개발 현황

선정안, 고성영, 박종오, 박석호
전남대학교 기계공학부

An Overview of the development for cable-driven parallel cable robot

Jeong-An Seon, Seong-Young Ko, Jong-Oh Park and Suk-Ho Park
School of Mechanical Engineering, Chonnam Nat. Univ.

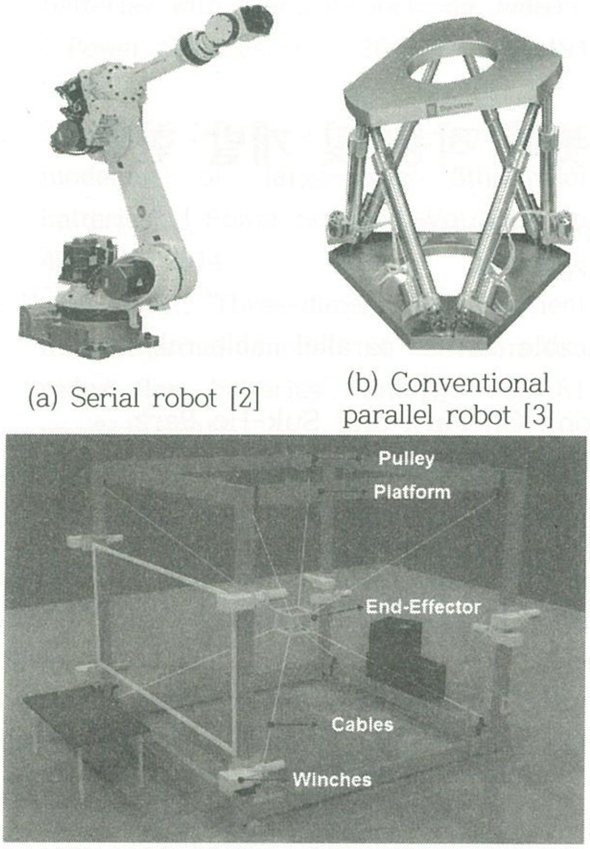
ABSTRACT

Cable-driven parallel robot(CDPR) is a special type of parallel robot. In the past two decades, CDPR has been studied under a lot of attention since it has various advantages such as large workspace, simple and light weight mechanical structure, low energy consumption, heavy payload capability, easy reconfigurability and scalability. This paper presents the theoretical research status of CDPRs. Then various applications of developed CDPRs are described in detail and other probable applications foresight are proposed.

Key Words : Application, Review, Cable-driven Parallel Robot, Cable Robot.

1. 서 론

로봇시장은 극한 작업환경, 고령화 및 노동임금 상승 등의 사회·경제적 문제의 해결방안으로 대두되고 있으며, 구글, 아마존과 애플은 로봇분야에 투자를 증대하고 있고, 향후 다양한 분야에서 인간의 노동을 대체하면서 시장 규모가 확대될 전망이다. 병렬형 로봇은 높은 위치 정밀도와 고속·고하중 구동을 할 수 있어 많은 관심을 받고 있는 분야이다. 케이블 로봇은 병렬형 로봇의 특별한 형태로 기존 강체로 구성된 링크를 케이블로 대체하여 작동되는 것을 말하며, 새로운 응용 분야를 창출하며 큰 발전이 예상된다. 직렬형 로봇, 병렬형 로봇, 케이블 로봇의 형태를 Fig. 1에서 보여주고 있다. 케이블로봇은 플랫폼, 엔드이펙터, 케이블, 윈치로 구성되며, 움직이는 부분의 무게가 기존 직렬형과 강체 링크형 병렬형 로봇과는 달리 상당히 경량으로, 빠른 속도와 가속도를 구현할 수 있다. 뿐만 아니라, 넓은 작업공간, 간단하고 가벼운 기계구조, 큰 가반하중이 요구되며 설치가 용이하고 확장성이 뛰어난 응용분야에 적합하다. 특히, 작업 공간을 쉽게 증가시킬 수 있으며 이론적으로 무한대로 확장이 가능하다. 이러한 특징들을 활용하여 1980년 후반부터 강체 링크형 병렬형 로봇을 대체하기 위한 연구가 진행 되어왔으며 미국 NIST의 ROBOCRANE [1]을 시작으로, 일본, 프랑스, 독일, 스페인, 캐나다, 이란, 중국에서 다양한 형태의 케이블 로봇이 연구되어왔다. 대표적 응용분야로 전파망원경, 구조/구난, 재활, 엔터테인먼트, 물류/운송, 풍동실험, 특정목적의 산업현장(선박과 항공의 부품조립, 페인팅, 백히팅) 등에서 적용을 시도하고 있다. 그러나 케이블 로봇은 엔드이펙터와 연결된 모든 케이블의 장력을 유지해야 한다는 공통적인 제약사항이 있다. 본 논문은 케이블 로봇의 특징을 바탕으로 진행하고 있는 이론적 연구 현황과 케이블 로봇의 장점을 활용한 새로운 응용분야에 대해 전반적으로 기술한다.



(a) Serial robot [2] (b) Conventional parallel robot [3]

(c) Cable-driven parallel robot

Fig 1. Types of robots

2. 케이블 로봇의 이론적 연구

2.1. 케이블 로봇의 분류

케이블 로봇은 엔드이펙터의 자유도와 케이블의 수에 기반하여 불충분구속(incompletely restrained parallel mechanism, IRPM)과 완전구속(completely restrained parallel mechanism, CRPM)으로 구분되어진다[4]. 일반적으로 제어를 위해 완전구속형태로 사용하며 이는 Fully constrained와 Suspended 케이블 로봇 두가지로 구분된다. 케이블이 강체가 아니므로 당길수만 있고 밀수는 없기 때문에 엔드이펙터의 자유도보다 케이블의 개수가 1개 이상 더 많이 필요하다[4]. 이런 형태를 Fully constrained 케이블로봇이라 한다. Suspended 케이블 로봇은 중력이 엔드이펙터에 하나의 자유도를 제공하는 형태로 엔드이펙터의 자유도와 케이블의 수가 같은 경우이다.

2.2. 기구학, 설계 및 분석

기구학은 정기구학과 역기구학으로 나뉘어진다. 일반적으로, 직렬형로봇에서는 정기구학의 해를 구하기 쉽고 역기구학이 어려운 반면에 병렬형로봇에서는 반대의 현상을 보인다. 특히, 케이블로봇은 자유도보다 추가적인 케이블이 필요한 특성 때문에 기존의 병렬형 로봇보다 정기구학의 해를 구하기 어렵다. 케이블로봇에서 역기구학은 유일한 해를 간단히 구할 수 있으나, 정기구학은 다수의 해를 갖게 되며 이를 구하기 위해서 분석적 방법이나 수치적 방법을 주로 사용한다.

분석적 방법으로 Elimination method [5], Continuation method [6], Grobner bases [7]가 주로 사용되며, 수치적 방법으로 Newton-Rapson method [8], Interval analysis [9], Neural network [10] 등이 사용된다. 최근 기구학의 정확성과 실시간성 향상을 위해 풀리기구학 [11] 등을 포함한 연구가 진행 중이며, 케이블의 특성을 고려하여 기구학을 계산하는 것에 관심이 기울어지고 있다.

케이블 로봇에서 주요한 구성품인 케이블의 길이에 영향을 미치는 케이블의 탄성, 처짐에 대한 연구가 진행되고 있으며, 케이블을 일반적으로 straight line, parabolic, catenary 모델로 설명한다. 계산의 편의성과 엔드이펙터의 움직임을 표현하는 데에는 straight line으로 충분하지만, 더 현실적이고 정확한 분석을 위해 parabolic이나 catenary 모델을 기구학에 적용하기도 한다. 케이블 로봇이 20m 이상으로 대형인 경우에는 케이블의 길이가 길어지며, 고속·고하중의 경우에는 케이블의 장력이 크게 증가하므로 케이블 직경이 커지게 된다. 이러한 경우, 케이블의 처짐과 자체 질량을 무시할 수 없다. 케이블 장력의 최적화 및 탄성, 처짐을 고려한 케이블의 길이 오차 감소에 관한 연구를 통하여 엔드이펙터를 원하는 위치에 정확하게 위치시키는데 그 목적이 있다.

케이블 로봇을 설계하여 실제 적용을 위해서 작업공간 분석은 필수적이다. 분석방법에는 정적작업공

간 [12, 13] 과 동적작업공간 [14, 15]이 있다. 정적작업공간은 Force closure workspace, Wrench feasible workspace, Wrench set로 분류되며, Discrete과 Continuous 방식으로 분석을 진행한다. 동적작업공간은 동적경로생성을 통하여 작업공간을 확장시키는 방법이다. 일반적으로 케이블 장력을 이용하여 작업공간 분석을 진행하고 있지만, 최근 케이블의 간섭과 충돌, Singularity를 고려한 작업 공간 분석을 수행하여 엔드이펙터의 실질적인 이동영역을 분석하는 연구가 진행 중이며, Velocity/force ellipsoid, Condition number, Manipulability를 통해 분석된 작업공간에서 엔드이펙터가 실제로 도달하지 못하는 영역에 대한 평가에 대한 연구가 진행되었다[16]. 또한, 케이블 강성은 케이블 로봇의 안정성 측정을 하는 주요한 지표로서 관심을 두고 있다 [17].

장력분배는 케이블 로봇에서 또 다른 중요한 문제 중 하나이다. 장력분배는 원하는 경로를 따라 엔드이펙터의 모션 제어가 고려되어야하며, 구동부인 윈치의 에너지 소비를 최소화 하고 작업 공간을 증대시키기 위해 장력분배를 최적화 하는 것이 요구된다. Verhoeven *et al.*은 최적 장력 분배를 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며 [18], 케이블 로봇의 형태에 따른 다양한 장력분배 방법들이 연구되고 있다.

2.3 로봇 제어

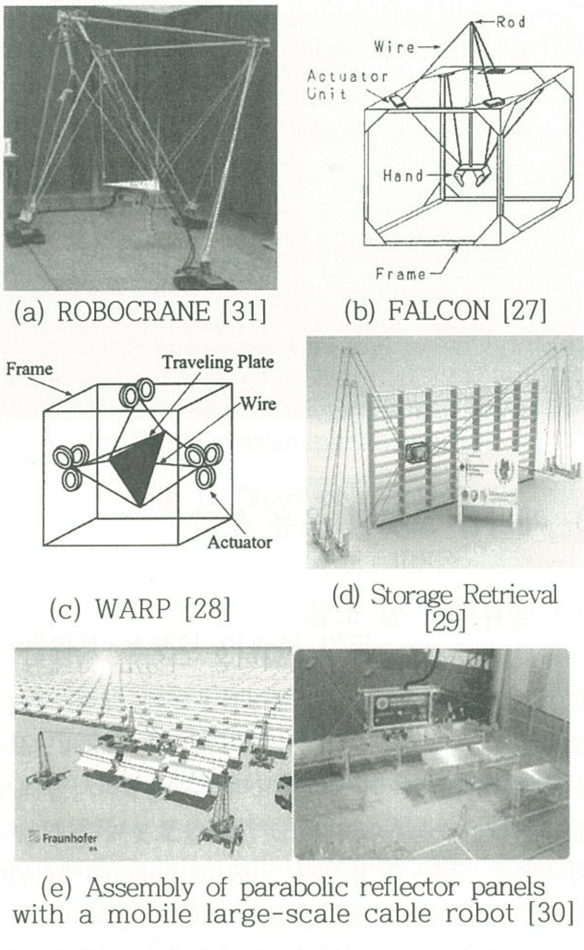
직렬형과 병렬형 로봇에 적용하기 위해 여러가지 제어 기법들이 개발되어 왔으며, 케이블로봇 역시 병렬형 로봇의 하나의 특별한 유형으로써 기존의 개발된 제어 기법들을 채택하고 있다. 가장 일반적인 제어방법은 케이블 길이를 제어하여 엔드이펙터를 원하는 위치로 이동시키기 위한 위치 피드백 제어이다. Kawamura *et al.*은 케이블 길이 제어를 위해 PD 제어기를 이용하였으며, 중력과 Internal forces를 보상하였다 [19]. Fang *et al.*은 케이블 길이를 제어하기 위해 최적화된 장력분배 기법을 반영한 Nonlinear feedforward 제어를 제안하였고 [20], Williams *et al.*은 각 케이블 길이 제어에 토크 제어기를 적용하였다 [21]. 엔드이펙터의 위치를 측정하기 위해서는 외부에 별도로 Laser tracker, IR sensor, Camera등이 설치되어야 한다. Dallej *et al.*은 위치 기반 Visual servoing을 제안하였다 [22]. 그러나 역기구학을 이용한 엔드이펙터의 위치제어 방법만으로는 고속에서 케이블이 느슨해지는 현상이 관찰되는 문제를 해결 할 수 없으며, 이러한 문제를 극복하기 위해 힘제어가 필요하기 때문에 케이블 로봇의 특성과 응용분야에 적합한 위치/힘 제어가 통합된 제어기법들이 연구 및 적용되고 있다. Kraus *et al.*은 각 케이블의 장력을 측정하여 하중에 의하여 케이블 늘어짐에 의한 엔드이펙터 처짐을 계산하여 실제 필요한 장력을 보상하여 위치 정밀도를 향상하는 방법을 제안하였으며 [23], 또한, Hybrid position-force control을 적용하여 접촉방향에 수직인 힘을 제공하는 제어를 구현하였다 [24]. Otis *et al.* 은 Hybrid admittance/impedance 제어를 통하여 자유로운 움직임과 가상의 물체에 발이 접촉했을 때의 현실성을 느끼게 해주는 방법을 제안하였고 [25], Zou *et al.*은 무중력상태에서 근력운동을 할 수 있도록 Hybrid force controller PID 제어기를 제안하였다 [26].

3. 케이블 로봇의 응용 분야

3.1 물류이송 및 조립

Fig. 2는 현재까지 개발되어온 다양한 형태의 물류이송 및 조립을 위한 케이블로봇에 대한 사례를 보여준다. 우선, 미국 NIST에서 1992년도에 ROBOCRANE을 개발하였으며, 이는 위치, 속도, 힘 제어가 가능한 6자유도 케이블로봇이다 [1]. 조립, 이송 등에 적용하기 위한 실험을 수행하였으며, 기구학, 강성, 작업공간에 대한 이론적 선행 연구를 수행하였다. 일본에서는 케이블 로봇을 고속조립에 적용할 목적으로 FALCON과 WARP을 개발하였다 [27, 28]. 특히, 1995년도에 개발된 7 Cable로 6자유도 구동이 가능한 FALCON은 가속도 43G, 최고속도 13m/s를 구현할 수 있어, Super-velocity의 가능성을 보여주었다. 독일의 Duisburg 대학에서는 SEGESTA를 개발하여 작업공간분석, 설계최적화, 장력계산 등의 이론적 연구

를 수행하였으며, 에너지 소비를 70% 이하로 획기적으로 감소시키면서 신속한 물류이송 및 적재 자동화가 가능한 효율적인 물류창고 운영을 목적으로 케이블 로봇을 적용하고자 하였고 [29], Fraunhofer - Gesellschaft IPA는 IPANEMA를 개발하여 신속한 작업공간분석, 힘 제어 연구를 수행하였으며, 케이블로봇의 넓은 작업공간과 재설치의 용이성을 활용하여 태양광 발전소 건설뿐만 아니라 다양한 건축물 조립 및 구축에 적용하고자 하였다 [30].



(a) ROBOCRANE [31] (b) FALCON [27]

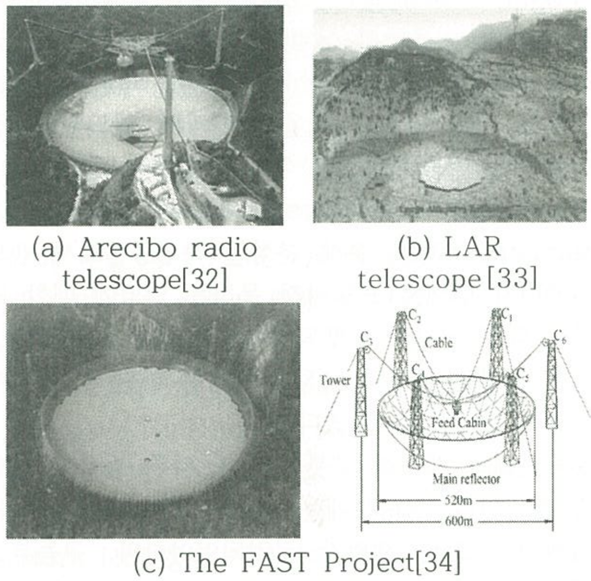
(c) WARP [28] (d) Storage Retrieval [29]

(e) Assembly of parabolic reflector panels with a mobile large-scale cable robot [30]

Fig 2. Applications for logistics, building construction

3.2 전파망원경

가장 주요한 응용분야의 하나로 수백 미터 크기를 가진 전파망원경의 수신부에 케이블로봇을 적용하는 것이다. 이와 관련된 대표적인 프로젝트로 미국 Arecibo, 캐나다 Lambert telescope, 중국 FAST [34] 를 들 수 있다. 반사경의 직경은 LAR 200m, Arecibo 305m, FAST 500m 이며, 수신부에 케이블을 연결하여 조작을 수행한다. Fig. 3에서 각 전파망원경의 모습을 보여주며, 이론적으로 무한대인 작업공간을 활용할 수 있는 케이블 로봇의 특징을 활용한 대표적인 예로 들 수 있다.



(a) Arecibo radio telescope[32] (b) LAR telescope[33]

(c) The FAST Project[34]

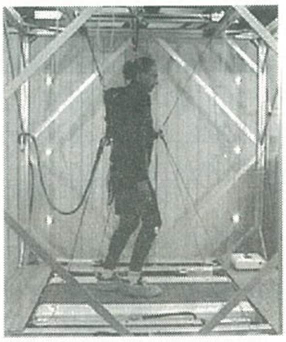
Fig 3. Applications for large radio telescopes

3.3 재활훈련 및 운동

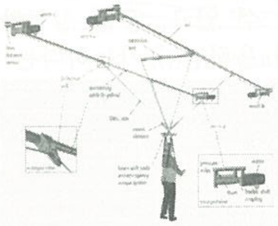
설치 및 조정이 용이하며, 저전력, 사용자에 적합한 엔드이펙터 가공, 다양한 시스템 설계에 용이한 장점을 이용하여 케이블로봇을 재활훈련에 적용하고자 연구를 수행하고 있다 (Fig. 4). 케이블을 이용하여 재활훈련에 적용하고자 하는 일본에서 1990년대 후반에 첫 시도가 있었으며, 이탈리아 Padova와 Trieste 대학에서 환자의 상지재활 치료를 목적으로 가볍고 가격경쟁력 있는 기계구조, 안전한 치료, 환자의 접근성, 이동 및 설치 용이성을 달성하기 위해 휠체어형태의 3자유도 케이블로봇인 NeReBot을 개발하였으며, 임상실험 결과 케이블로봇을 활용한 치료가 효과적임을 보였다 [35]. 독일의 Fraunhofer - Gesellschaft IPK는 재활의 다양한 강도를 제공하기 위해 Force Control로 걷는 동안의 힘을 줄여주는 String-Man을 개발하였다 [36]. 스위스는 이동형 케이블로봇 The FLOAT을 이용하여 환자가 하네스를 입고 재활 훈련을 정해진 트랙을 돌면서 안전하게 다양한 형태의 재활 훈련이 가능하도록 하였으며 [37], 미국은

위치/힘 제어를 활용하여 환자가 3차원 공간상에서 재활훈련을 하고 이를 기록하여 평가하는 재활훈련시스템을 위한 MACARM을 개발하였다 [38].

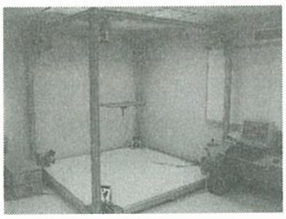
(a) NeReBot [35]



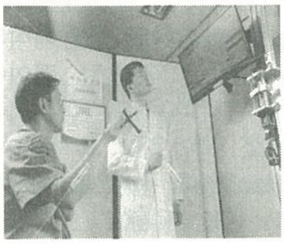
(b) String Man [36]



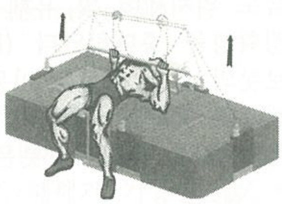
(c) The FLOAT [37]



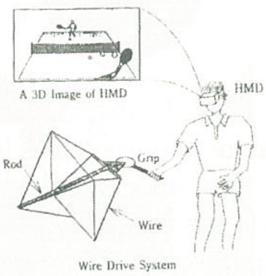
(d) MACARM [38]



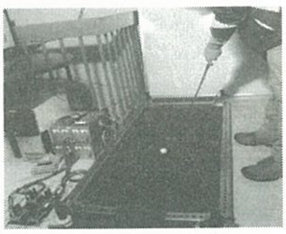
(e) CNU-RRI Rehabilitation Training



(f) Astronaut rehabilitative training [26]



(g) Virtual tennis system [40]



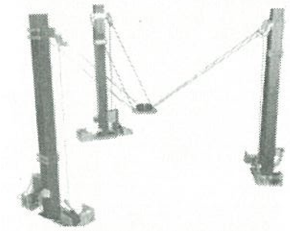
(h) Haptically assisted golf putting [41]

Fig 4. Applications for rehabilitation and training

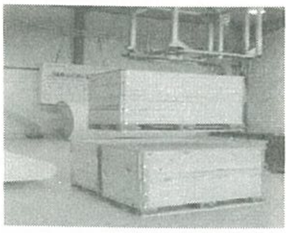
한국은 전남대 로봇연구소(RRI)에서 상지재활훈련의 효과를 증대시키기 위해 기구현된 동작, 자유운동, 저항을 이겨내는 자유운동의 3가지 재활모드가 탑재된 평면형 케이블 로봇을 개발하였으며[39], 설치 및 조정이 용이한 형상 가변형 케이블 로봇에 대한 연구를 수행하고 있다. 이밖에도 훈련시스템에 케이블로봇을 연구하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 무중력상태에서 중력을 케이블로봇으로 제공하여 우주비행사들이 운동을 할 수 있는 시스템 [26], 가상현실 테니스 연습 [40], 골프퍼팅연습 [41], Virtual Play Ball [42] 등 다양한 훈련에 적용하려는 시도가 있다.

3.4 산업 응용 분야

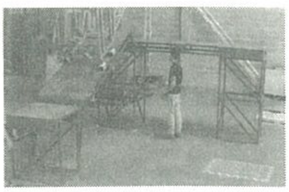
유럽의 TECNALIA에서는 ReelAx, CoGiRo 케이블 로봇을 개발하여 프레임크기(15x11x6m)의 약 80% 정도를 작업공간으로 활용할 수 있도록 연구를 수행하였으며, 위치정밀도 50mm, 반복도 3mm 정확성을 확보하였다. 산업현장에 다양하게 적용하기 위하여 물류이송, 조립, 페인팅에 적용할 수 있는 가능성을 보여주었다 (Fig. 5).



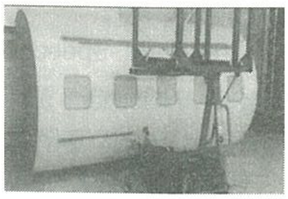
(a) ReelAx[43]



(b) Pick and Place[44]



(c) Assembly[44]



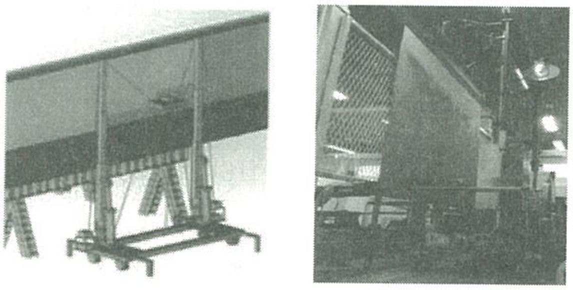
(d) Painting[44]

Fig 5. Applications for industry field in TECNALIA

대우조선해양(DSME)은 Fraunhofer - Gesellschaft IPA, 전남대 로봇연구소(RRI)와 각각 선박의 도장(Painting) (Fig. 6(a))과 백히팅(Back-heating)관련 프로젝트를 수행하였다 (Fig. 6(b)). IPA는 케이블로봇기반 선박도장 연구수행중이며, 전남대 로봇

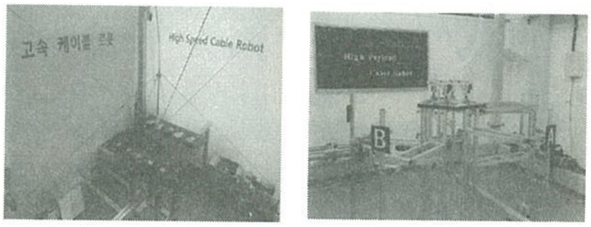
연구소(RRI)는 평면형 백히팅 케이블 로봇을 개발하여 납품하였다. 백히팅이란 용접에 의해 철판에 열응력으로 휘어진 부분을 다시 열을 가하여 복구시키는 것이다. 개발된 케이블로봇의 주요특징으로는 5m이상의 다양한 철판의 크기에 백히팅 작업을 자동화 시킬 수 있도록 3~5m의 수직 높이 가변형 프레임, 생산성 향상을 위해 두개의 백히팅 라인을 동시에 작업하는 것이다.

또한 산업용 응용분야 발굴을 위해 High speed와 High payload용 케이블 로봇을 개발을 수행중이며 (Fig. 6(c)-(d)), High speed는 가속도 10G, 최대속도 10m/s로 소형 부품의 분류작업용 및 조립용으로, High payload는 넓은 작업공간에서 300kg의 하중을 갖는 물류이송 및 Advanced hoist, Dynamic path generation 목적으로 개발을 진행 중이다.



(a) painting cable robot for ship in IPA

(b) Back-heating planar cable robot



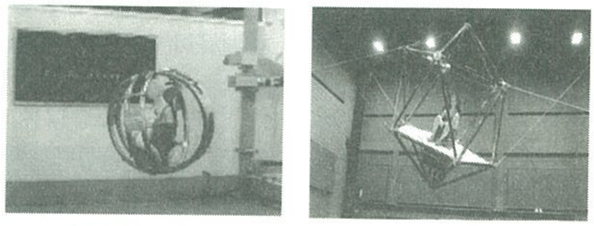
(c) High Speed

(d) High Payload

Fig 6. Applications for industry field in IPA and RRI

3.5 테마파크(Entertainment)

독일과 한국이 협업하여 새로운 로보틱 롤러코스터를 케이블로봇에 적용하고자 Dynamic trajectories를 개발하였고 [45], 전남대 로봇연구소는 사람을 탑승시키기 위해 Fig. 7(a)와 같이 연구를 수행하였다. 독일은 Max Planck Institute에서 더 진보된 CableRobot Simulator를 Fig. 7(b)와 같이 개발하여 가상현실기반 롤러코스터 탑승 시스템으로 스릴을 제공하는 시스템을 개발하였다 [46].



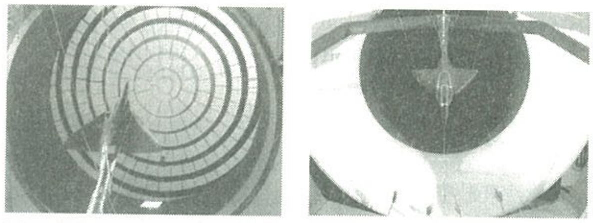
(a) CNU-RRI 6DOF roller coaster

(b) CableRobot Simulator[46]

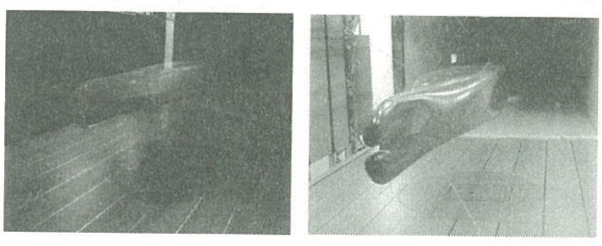
Fig 7. Applications for entertainment

3.6 풍동 실험

1980년대 케이블을 매달아 풍동실험을 부분적으로 수행되고 있었으나, 케이블로봇이 도입되면서 케이블이 풍동 실험할 축소모형 보다 그 크기가 매우작고 높은 하중을 견딜 수 있고, 풍동 실험하는 동안 반복적 조작 및 동적 움직임이 가능하다는 장점으로 연구가 진행되었다. 프랑스 ONERA에서 비행체의 거동을 좀 더 정확하게 이해하기위해 SACSO Project를 수행하였으며, 풍동실험에 케이블로봇을 적용하고자 Kinematic 분석 방법과 Tension과 동적 특성에 관한 연구를 진행하였다 (Fig. 8(a)). 독일 Duisburg대학에서는 풍동 내부 선박 모델 유체해석에 케이블로봇을 활용하여 6자유도 위치제어 및 유체 교란 최소화로 풍동해석의 정확성을 증대하였다 (Fig. 8(b)). 개발된 케이블로봇의 주요 특징은 이동형 윈치 시스템이며, 이론적으로 기구학, 동역학 모델, 작업공간 분석이 수행되었고, 개발된 로봇은 Hamburg 대학에 설치되어 있다.



(a) SACSO, Active suspension for wind tunnel tests [45]

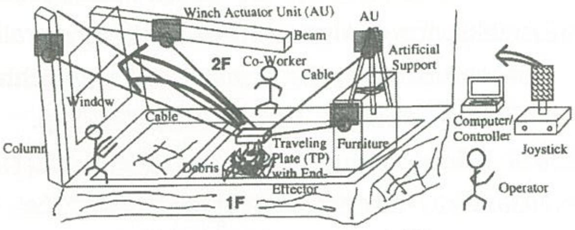


(b) Developed wind tunnel by Duisburg [46]

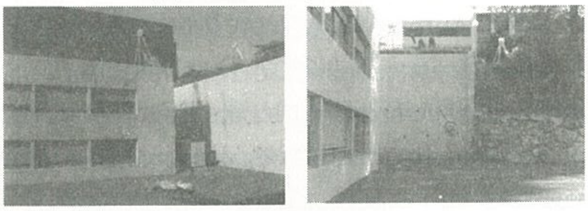
Fig 8. Applications for wind tunnel

3.7 구조/구난

지진 발생이 많은 일본에서 지진발생 후 이동 가능한 구조시스템에 케이블로봇을 적용하고자 제안 (Fig. 9(a)) 하였고[49], 프랑스의 INRIA는 재활과 모바일형 크레인에 초점을 맞추어 MARIONET을 개발하였으며 (Fig. 9(b)), 이중 MARIONET-CRANE은 재난구조를 목적으로 넓은 공간(75x45x25m)에서 6자유도 움직임이 가능한 케이블 로봇으로 2.5톤 무게를 들어 올릴 수 있고 이동이 가능하며 10분 안에 설치가 가능하다 [50].



(a) Rescue system [49]



(b) MARIONET-CRANE [51]

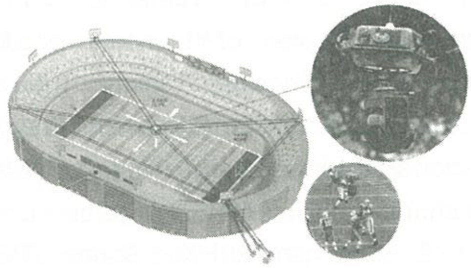
Fig 9. Applications for rescue

3.8 기타 응용분야

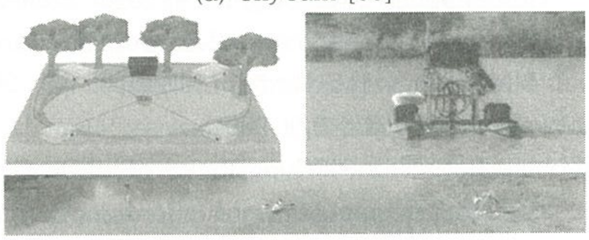
이밖에도 넓은 경기장에서 카메라 촬영을 용이하게 할 수 있는 SkyCam은 1987년도에 적용되었으며 (Fig. 10(a)), 쉽게 조립/해체가 가능한 장점을 이용하여 강 또는 호수 수면과 물속을 정밀하게 탐사하기 위한 환경 모니터링용 시스템 [52], 대형 비행체 및 기구물 조립, 도킹시스템 등이 개발되었다 (Fig. 10(b)-(c)).

4. 결 론

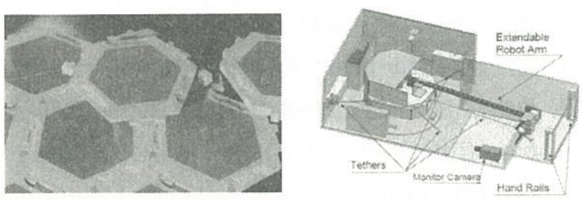
케이블 로봇은 다양한 응용 분야에 적용 가능한 잠재성이 높은 로봇이며, 여전히 많은 이론적 조사 및 연구가 수행되어져야 할 분야이다. 특히, 케이블 로봇은 다양한 분야에 적용 가능하도록 연구가 진행 중이며, 작업공간, 장력분배 및 제어 분야, 추가로 케이블 특성 및 넓은 작업공간에서의 교정 및 측정 문제 등을 개선하기 위한 다양한 방법들이 제안되고 있다. 직렬형 로봇과 달리 병렬형 로봇 중에서도 케이블 로봇은 비행기 부품 및 선박의 조립, 우주비행체의 도킹시스템, 시뮬레이션 시스템 등 새로운 분야에서의 로봇 적용이 가능하다. 앞으로 신시장 개척을 위해 케이블 로봇에 대한 관심이 향상 될 것이며, 산업체와 연계한 응용분야가 활발히 연구될 것으로 기대된다.



(a) SkyCam [53]



(b) Environmental monitoring system [52]



(c) JAXA REX-J [54, 55]

Fig 10. Other Applications

Acknowledgement

본 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 해외우수연구기관 유치사업연구임(과제번호:2012K1A4A3026740).

참고문헌

[1] J. Albus, R. Bostelman, and N. Dagalakis, "The NIST robocrane," Journal of Robotic Systems, vol. 10, pp. 709-724, 1993.

[2] Webpage. FANUC Serial Robot. Available:

http://www.directindustry.com/prod/fanuc-robotics/product-14532-470353.html
[3] Webpage. SYMETRIE Steward Parallel Robot. Available: https://www.motioncontrol.com/products/zonda-hexapod-high-precision-and-heavy-payload/
[4] A. Ming and T. Higuchi, "Study on multiple degree of freedom positioning mechanism using wires (Part 1): Concept, design, and control," Int. J. Jpn. Soc. Precision Engineering, vol. 28, pp. 131-138, 1999.
[5] T.-Y. Lee and J.-K. Shim, "Forward kinematics of the general 6-6 Stewart platform using algebraic elimination," Mechanism and Machine Theory, vol. 36, pp. 1073-1085, 9// 2001.
[6] M. Raghavan, "The Stewart Platform of General Geometry Has 40 Configurations," Journal of Mechanical Design, vol. 115, pp. 277-282, 1993.
[7] A. K. Dhingra, A. N. Almadi, and D. Kohli, "A Grobner-Sylvester Hybrid Method for Closed-Form Displacement Analysis of Mechanisms," Journal of Mechanical Design, vol. 122, pp. 431-438, 1999.
[8] C. C. Nguyen, S. C. Antrazi, Z.-L. Zhou, and C. E. Campbell Jr, "Analysis and implementation of a 6 DOF Stewart Platform-based robotic wrist," Computers & Electrical Engineering, vol. 17, pp. 191-203, // 1991.
[9] J. P. Merlet, "Solving the Forward Kinematics of a Gough-Type Parallel Manipulator with Interval Analysis," The International Journal of Robotics Research, vol. 23, pp. 221-235, 2004.
[10] Z. Geng and L. Haynes, "Neural network solution for the forward kinematics problem of a Stewart platform," in Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on, 1991, pp. 2650-2655 vol.3.
[11] V. Schmidt and A. Pott, "Implementing Extended Kinematics of a Cable-Driven Parallel Robot in Real-Time," in Cable-Driven Parallel Robots, T. Bruckmann and A. Pott, Eds., ed Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 287-298.
[12] C. B. Pham, S. H. Yeo, G. Yang, M. S. Kurbanhusen, and I. M. Chen, "Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanisms," Mechanism and Machine Theory, vol. 41, pp. 53-69, 1// 2006.
[13] M. Gouttefarde, J. P. Merlet, and D. Daney, "Wrench-Feasible Workspace of Parallel Cable-Driven Mechanisms," in Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on, 2007, pp. 1492-1497.
[14] G. Barrette and C. m. M. Gosselin, "Determination of the Dynamic Workspace of Cable-Driven Planar Parallel Mechanisms," Journal of Mechanical Design, vol. 127, pp. 242-248, 2005.
[15] C. Gosselin, "Global Planning of Dynamically Feasible Trajectories for Three-DOF Spatial Cable-Suspended Parallel Robots," in Cable-Driven Parallel Robots, T. Bruckmann and A. Pott, Eds., ed Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 3-22.
[16] C. B. Pham, S. H. Yeo, G. Yang, and I. M. Chen, "Workspace analysis of fully restrained cable-driven manipulators," Robotics and Autonomous Systems, vol. 57, pp. 901-912, 9/30/ 2009.
[17] A. M. Hay and J. A. Snyman, "Optimization of a planar tendon-driven parallel manipulator for a maximal dextrous workspace," Engineering Optimization, vol. 37, pp. 217-236, 2005/04/01 2005.
[18] R. Verhoeven and M. Hiller, "Tension Distribution in Tendon-Based Stewart Platforms," in Advances in Robot Kinematics:

Theory and Applications, J. Lenar?i? and F. Thomas, Eds., ed Dordrecht: Springer Netherlands, 2002, pp. 117-124.

[19] S. Kawamura, H. Kino, and C. Won, "High-speed manipulation by using parallel wire-driven robots," Robotica, vol. 18, pp. 13-21, 2000.

[20] S. Fang, D. Franitza, M. Torlo, F. Bekes, and M. Hiller, "Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 9, pp. 561-568, 2004.

[21] R. L. Williams, P. Gallina, and J. Vadia, "Planar Translational Cable-Direct-Driven Robots," Journal of Robotic Systems, vol. 20, pp. 107-120, 2003.

[22] T. Dallej, M. Gouttefarde, N. Andreff, R. Dahmouche, and P. Martinet, "Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots," in Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on, 2012, pp. 1581-1586.

[23] W. Kraus, V. Schmidt, P. Rajendra, and A. Pott, "Load identification and compensation for a Cable-Driven parallel robot," in Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on, 2013, pp. 2485-2490.

[24] W. Kraus, P. Miermeister, V. Schmidt, and A. Pott, "Hybrid Position-Force Control of a Cable-Driven Parallel Robot with Experimental Evaluation," Mechanical Sciences, vol. 6, pp. 119-125, 2015.

[25] M. J. D. Otis, M. Mokhtari, C. d. Tremblay, D. Laurendeau, F. M. d. Rainville, and C. M. Gosselin, "Hybrid Control with Multi-Contact Interactions for 6DOF Haptic Foot Platform on a Cable-Driven Locomotion Interface," in Haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, 2008. haptics 2008. symposium on, 2008, pp. 161-168.

[26] Z. Yupeng, Z. Lixun, Q. Tao, and L. Yingbin, "Force control for an astronaut rehabilitative training robot in bench press mode," in Complex Medical Engineering (CME), 2013 ICME International Conference on, 2013, pp. 296-301.

[27] S. Kawamura, W. Choe, S. Tanaka, and S. R. Pandian, "Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system," in Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on, 1995, pp. 215-220 vol.1.

[28] K. Maeda, S. Tadokoro, T. Takamori, M. Hiller, and R. Verhoeven, "On design of a redundant wire-driven parallel robot WARP manipulator," in Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on, 1999, pp. 895-900 vol.2.

[29] T. Bruckmann, C. Sturm, L. Fehlberg, and C. Reichert, "An energy-efficient wire-based storage and retrieval system," in Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2013 IEEE/ASME International Conference on, 2013, pp. 631-636.

[30] A. Pott, C. Meyer, and A. Verl, "Large-scale assembly of solar power plants with parallel cable robots," in Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK), 2010, pp. 1-6.

[31] Webpage. NIST ROBOCRANE. Available: http://www.nist.gov/el/isd/gantry-2.cfm

[32] Wikipedia. Arecibo Observatory. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Arecibo_Observatory

[33] Webpage. LAR. Available: http://www.casca.ca/ecass/issues/2003-me/news/doherty/ecassi.html

[34] X. Tang and Z. Shao, "Trajectory generation and tracking control of a multi-level

hybrid support manipulator in FAST," Mechatronics, vol. 23, pp. 1113-1122, 12// 2013.

[35] G. Rosati, M. Andreolli, A. Biondi, and P. Gallina, "Performance of cable suspended robots for upper limb rehabilitation," in Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on, 2007, pp. 385-392.

[36] D. Surdilovic, Z. Jinyu, and R. Bernhardt, "STRING-MAN: Wire-robot technology for safe, flexible and human-friendly gait rehabilitation," in Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on, 2007, pp. 446-453.

[37] H. Vallery, P. Lutz, J. v. Zitzewitz, G. Rauter, M. Fritschi, C. Everarts, et al., "Multidirectional transparent support for overground gait training," in Rehabilitation Robotics (ICORR), 2013 IEEE International Conference on, 2013, pp. 1-7.

[38] D. Mayhew, B. Bachrach, W. Z. Rymer, and R. F. Beer, "Development of the MACARM - a novel cable robot for upper limb neurorehabilitation," in Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on, 2005, pp. 299-302.

[39] X. Jin, D. I. Jun, X. Jin, J. Seon, A. Pott, S. Park, et al., "Upper Limb Rehabilitation Using a Planar Cable-Driven Parallel Robot with Various Rehabilitation Strategies," in Cable-Driven Parallel Robots: Proceedings of the Second International Conference on Cable-Driven Parallel Robots, A. Pott and T. Bruckmann, Eds., ed Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 307-321.

[40] S. Kawamura, M. Ida, T. Wada, and W. Jing-Long, "Development of a virtual sports machine using a wire drive system-a trial of virtual tennis," in Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on, 1995, pp. 111-116 vol.1.

[41] P. Y. Huang, J. A. Kunkel, J. Brindza, and K. J. Kuchenbecker, "Haptically assisted golf putting through a planar four-cable system," in World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE, 2011, pp. 191-196.

[42] T. Morizono, K. Kurahashi, and S. Kawamura, "Realization of a virtual sports training system with parallel wire mechanism," in Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on, 1997, pp. 3025-3030 vol.4.

[43] J.-B. Izard, M. Gouttefarde, M. Michelin, O. Tempier, and C. Baradat, "A Reconfigurable Robot for Cable-Driven Parallel Robotic Research and Industrial Scenario Proofing," in Cable-Driven Parallel Robots, T. Bruckmann and A. Pott, Eds., ed Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 135-148.

[44] YouTube. (2016). COGIRO: Cable Robot for agile operation in large workspaces Available: https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=6RjBKvoc6N4

[45] V. Schmidt, W. Kraus, W. Y. Ho, J. Seon, A. Pott, J.-O. Park, et al., "Extending Dynamic Trajectories of Cable-Driven Parallel Robots as a Novel Robotic Roller Coaster," in ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics; Proceedings of, 2014, pp. 1-7.

[46] YouTube. (2015). MPI CableRobot-Simulator Available: https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=cJCsomGwdk0

[47] Webpage. (2002). SACSO, Active suspension for wind tunnel tests. Available: http://www.onera.fr/en/dcsd/sacso?page=1

[48] Webpage. Hamburg University of Technology

- Wind Tunnel Experiments. Available: https://www.tuhh.de/fds/experimental-and-computing-facilities/large-low-speed-wind-tunnel/image-gallery-wind-tunnel-2.html?tx_gooffotoboek_pi1%5Bfunc%5D=thumb&tx_gooffotoboek_pi1%5Bfid%5D=1&tx_gooffotoboek_pi1%5Bsrcdir%5D=WindTunnelExperiments&cHash=1fbb05f970666050c93b77da32afa00b#31019

[49] S. Tadokoro, R. Verhoeven, M. Hiller, and T. Takamori, "A portable parallel manipulator for search and rescue at large-scale urban earthquakes and an identification algorithm for the installation in unstructured environments," in Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS '99. Proceedings. 1999 IEEE/RSJ International Conference on, 1999, pp. 1222-1227 vol.2.

[50] J. P. Merlet and D. Daney, "A portable, modular parallel wire crane for rescue operations," in Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on, 2010, pp. 2834-2839.

[51] YouTube. (2010). INRIA - Large wire-driven parallel rescue crane Available: https://www.youtube.com/watch?v=J1DUd-anjAA&feature=player_detailpage

[52] P. H. Borgstrom, B. L. Jordan, B. J. Borgstrom, M. J. Stealey, G. Sukhatme, M. A. Batalin, et al., "NIMS-PL: A Cable-Driven Robot With Self-Calibration Capabilities," Robotics, IEEE Transactions on, vol. 25, pp. 1005-1015, 2009.

[53] Webpage. SkyCam. Available: http://www.baseball-fever.com/showthread.php?103877-Future-of-MLB-on-Television/page2

[54] Webpage. REX-J(JAXA-Cable Robot). Available: http://robotics.jaxa.jp/ENG/e_rexj.html

[55] YouTube. REX-J(JAXA-Cable Robot). Available: https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=bqAwSLBhKCo