

# 上肢リハビリ訓練ロボット

## EMUL, セラフィ, PLEMO シリーズの研究開発



研究ノート

古 荘 純 次\*

Research and Development of Rehabilitation Robots for  
Upper Extremities EMUL, Serafy, PLEMO Series

Key Words : Rehabilitation Robot, Virtual Reality, Force Display,  
Functional Material Brake

### 1. はじめに

高齢化の急速な進行にともない要介護者が増加するなかで、リハビリ・介護へのメカトロニクス技術導入の必要性は、ますます大きくなりつつある。このような状況に鑑み、日本機械学会誌2016年1月特集号「リハビリ・介護とメカトロニクス」を主査として企画した[1][2]。

リハビリのためのロボットは、機能の回復を目的とするリハビリ訓練ロボットと、失われた運動機能を補助することによって運動機能を再建するアシストロボットに分けることができる。本稿では、古莊を中心として行ってきた、脳卒中を主な対象とする上肢リハビリ訓練ロボットの研究開発について紹介する。

リハビリ訓練ロボットの研究開発、機能性流体などについては、上記特集号、文献[3] (Journal of Robotics and Mechatronics のホームページからダウンロード可)、文献[4]などを参照されたい。

脳卒中（脳梗塞、脳出血、クモ膜下出血）の患者数は現在約150万人といわれ、2020年には約300万人となることが予想されている。また、寝たきりになる原因の3割近くが脳卒中の脳血管疾患であり、全医療費の1割近くが脳卒中診療に費やされ

ている。脳卒中治療ガイドライン2015から分かるように、リハビリ訓練の量を増やすことによってADL（日常生活動作）や歩行速度の向上が見られる[5]。

脳卒中のリハビリテーションに関する考え方が、世界的に変わりつつあり、コンピュータ・システムを導入した各種のリハビリ装置が、リハビリテーションにおいて効果的であることが明らかになってきている。入院患者の1日のうち、訓練や学習に使用されるのは、ごくわずかに過ぎず、ロボティクス・メカトロニクス・VR技術を用いて訓練を半自動化する事で、手軽に長時間訓練を行うことができる。また、訓練者の能力に応じて、難しい課題へと段階的に移行させていく必要があり、包括的かつ情報技術を導入したリハビリ訓練システムが必要である。

リス猿の脳の1次運動野手指領域に人工的に脳梗塞を作り行った実験で、リハビリをすることにより、脳の可塑性に基づく運動機能の回復が初めて科学的に証明されたのは、1996年のScienceのNudeらの論文である。適切なリハビリを行うとき、脳卒中患者の50～80%が自立歩行に至るのに対して、上肢については、実用手を獲得できる比率が低く、臨床的にも長らくほぼ放置されてきた[6]。

### 2. Active型上肢リハビリ訓練ロボットの研究開発



\* Junji FURUSHO

1947年3月生  
大阪大学 大学院工学研究科 機械工学  
専攻 博士課程単位取得満期退学  
(1975年)  
現在、大阪電気通信大学 医療福祉工学科  
客員教授 一般財団法人ファジィシステム研究所 特別研究員  
大阪大学名誉教授 工学博士 リハビリテーション  
ロボティクス、機能流体メカトロニクス  
など

TEL : 072-824-1131 (内線3543)  
E-mail : furusho@isc.osakac.ac.jp  
furusho.junji.reh@gmail.com

大阪大学古莊研究室で開発したER流体アクチュエータを用いた2次元上肢リハビリ訓練ロボット「仁王I」を図1に、MR流体アクチュエータを用いた力覚提示システムを図2に示す。ER流体は、電場でそのレオロジー特性が制御できる流体であり、高電圧の印加を必要とする。MR流体は、磁場でそのレオロジー特性が制御できる流体であり、低電圧駆動が可能である。



図1 仁王-I



図2 MR アクティブ

次に、大阪大学の古荘研究室は、旭化成グループとともに、5ヵ年 NEDO プロジェクト「身体機能リハビリ支援システム（1999～2003年度）」において、安全確保のためにER流体アクチュエータ[2][4]を採用した3次元上肢リハビリ支援システムEMULを開発した[4][7]（図3）。プロジェクトの最終年度に、兵庫医大病院において、脳卒中患者を対象とする臨床評価を行い、良好な結果を得た[8]（表1、表2）（評価については文献[9]）。全症例とともに、機能的にプラトーと考えられる状態であった。しかし、EMULを用いて、1日40分、週3回のリハビリ訓練を6週間行った結果、表2に示すように、統計学的に有意な改善が得られた。

次に、2ヵ年 NEDO プロジェクト「次世代ロボット実用化プロジェクト」（2004～2005年度）において、手首を含む6自由度の上肢リハビリ支援システム「セラフィ」（図4）（グッドデザイン賞受賞）を開発し、愛知万博で実演展示を行った[10]。

さらに、EMUL、セラフィを用いて、運動学習[11][12]や小脳性運動失調症に関する研究[13]を行った。



図3 EMUL



図4 セラフィ

### 3. Passive型リハビリ訓練ロボットの研究開発

EMUL、セラフィは、1000万円程度と高価であったため、リハ専門病院等に適するものであった。そこで、阪大古荘研では、力覚提示にブレーキのみを用いたPLEMOシリーズを研究開発した。ブレーキを用いたシステムは、本質安全性を有し、医療機器としてはクラスIとなる[14]。PLEMO-P-Prototype（日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞）

表1 年齢・性別・損傷部位・発症後日数

60歳女性	右視床梗塞	45ヶ月
67歳男性	右放線冠梗塞	18ヶ月
20歳男性	左頭頂葉皮質出血	39ヶ月
62歳女性	左前頭葉皮質梗塞	94ヶ月
67歳女性	右放線冠梗塞	110ヶ月
57歳女性	左前頭葉皮質梗塞	40ヶ月

表2 EMULによる臨床評価結果

Results of Assessment at Pre-treatment and Post-treatment

Methods of Assessment (Range of Points)	Pre-treatment mean± SD	Post-treatment mean± SD	p
FMA* ; total (0 ~ 66)	45.2±11.3	51.2±11.7	0.0273
FMA ; Shoulder/Elbow/Frearm (0 ~ 36)	25.8±7.5	28.3±6.1	0.0412
FMA ; wrist(0 ~ 10)	5.2±2.6	6.2±4.2	0.2356
FMA ; finger(0 ~ 14)	11.2±3.1	12.7±1.2	0.2763
FMA ; speed/coordination (0 ~ 6)	3.0±1.9	4.0±1.5	0.0633
Motricity index (0 ~ 100)	77.7±7.6	85.8±10.0	0.0679
Grasping Power [N]	8.0±3.6	10.8±3.9	0.0782
12-Stages -Grade by Ueda (0 ~ 12)	6.2±1.8	7.7±2.3	0.0412

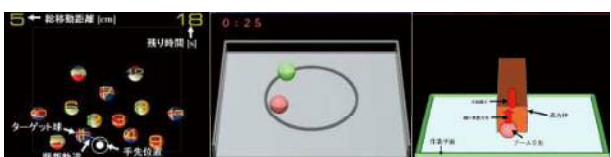
\*FMA: Fugl-Meyer Assessment



図5 PLEMO-P-Prototype



図6 PLEMO-P3



リーチング       トラッキング      力の調整

図7 PLEMO-P3 の基本リハビリ訓練ソフト

を図5に[15]、PLEMO-P3を図6に示す[2][16][17]。PLEMO-P-Prototypeの技術を基礎として、大阪大学古荘研においてPLEMO-P3は研究開発された。PLEMO-P3の基本リハビリ訓練ソフトを図7に示す。PLEMO-P3は、脳卒中患者に対する臨床評価に

おいて、大きなりハビリ訓練効果をあげた（表3）。

対象は本研究の趣旨を理解し、実験の参加に承諾が得られた脳卒中患者10名、平均年齢66.3±5.4歳、実験開始時の上肢BRSはStageIIIが1名、StageIVが4名、StageVが2名、StageVIが3名であった。表中の「PLEMO-P3」は、通常のリハ訓練に加えてPLEMO-P3を用いたリハビリ訓練を行うことを意味し、「リハビリ」は、通常のリハ訓練のみを意味する。表中の数値は、訓練開始時から2週間後のFugl-Meyer評価[9]の改善を示す。週3回、1日30分のPLEMO-P3によるリハビリ訓練を追加することにより、大きなりハビリ訓練効果が得られることがわかる。図8に、PLEMO-P3の把持部センサによる共同運動の検出のデータを示す。図中のStageは、ブルンストロームStage[9]を意味する。PLEMO-P3では、高電圧を使用するER流体[2][4][12]を用いているという問題点があった。そこで、現在では、ER流体を用いないで、リハビリ訓練システムの研究開発を行っている。

表3 PLEMO-P3による臨床評価結果

	PLEMO-P3	リハビリ	Significant difference
上肢	1.75±1.98	-0.13±1.46	P<0.05
手関節	1.25±1.16	-0.25±0.35	P<0.01
手指	0.88±1.46	0.13±0.35	N.S
協調性	0.25±0.71	0±0	N.S
感覚	1.5±1.77	0±0	N.S

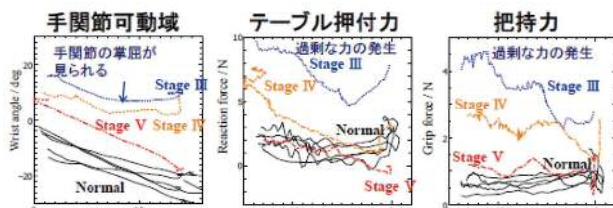


図8 PLEMO-P3の把持部センサによる共同運動の検出



図9 PLEMO-Y

経産省平成22年度補正予算「課題解決型医療機器の開発・改良に向けた病院・企業間の連携支援事業」実証事業（平成23年3月から平成24年2月）において、（全32）「脳卒中患者に対する上肢機能訓練用医療機器の開発（PL：古荘純次）」を実施しPLEMO-Yを開発した（図9）。PLEMO-Yの主な特徴は、(1) システム全体の低コスト化、(2) ブレーキへの印加電圧の低電圧化、などである。

PLEMO-Yのリハビリ訓練ソフトは、図7に示す基本リハビリ訓練ソフトを含む阪大古荘研で開発したりハビリ訓練ソフトである。プロジェクト終了後、福井工大古荘研において、PLEMO-Yを科研により改良した。

#### 4. PLEMO-Y（科研）の改良、実用化機 PLEMO-Z、健側補助・両手型 PLEMO-BAT の研究開発

2015年4月に古荘は、大阪電気通信大学に移り、大阪電気通信大学機械工学科吉田研究室、大阪府立大学工業高等専門学校電子情報コース早川研究室、などの協力により、PLEMO-Y（科研）の改良を行った。

図10に示すPLEMO-Zは、大きなりハビリ訓練効果を挙げたPLEMO-P3に、阪大古荘研で開発したりハビリ訓練ソフト及び改良ソフトを追加した訓練ソフト強化版であり、卓上でも使用可能なコンパクト版であり、機構も一新したローコスト版である。すなわち、PLEMO-Zは、本格的実用化版[18]であり、1次試作機の開発を終えたところである。

図11は、福井工大古荘研究室で開発した健側補助・両手型のリハビリ訓練ロボットの一次試作機である。力覚の提示にはブレーキを用いており、医療機器としてはクラスI。となる[14]。図11は左右の手が同方向に向かう同側型であるが、鏡面対称型も研究開発中である。



図10 PLEMO-Z



図11 PLEMO-BAT（同側型）

## 参考文献

- [1] 古荘純次, 他, (総説) リハビリ・介護とメカトロニクス, 日本機械学会誌・2016年1月特集号「リハビリ・介護とメカトロニクス」, Vol.119, No.1166, pp.4-7 (2016).
- [2] 古荘純次, 他, (解説) 非装着型上肢リハビリ支援システム, 日本機械学会誌, Vol.119, No.1166, pp.19-21 (2016).
- [3] J. Furusho, et al., (Review) Research and Development of Functional Fluid Mechatronics, Rehabilitation Systems, and Mechatronics of Flexible Drive Systems, Vol.28, No.1 (2016).
- [4] 古荘純次, 他:“(解説) 上・下肢リハビリーション, 福祉機器へのロボット技術の適用”, 総合リハビリテーション, 35(5), pp.439-445, (2007).
- [5] 日本脳卒中学会脳卒中ガイドライン委員会編集, 脳卒中治療ガイドライン 2015, 協和企画 (2015).
- [6] 編集主幹: 里宇明元, 才籐英一, 出江慎一, リハビリテーション医学の新しい流れ, 先端医療技術研究所 (2005).
- [7] 古荘純次, 他, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.5, pp.629-636 (2005).
- [8] 宮越浩一, 道免和久, 小山哲夫, 古荘純次, 小柳健一, リハビリテーション医学, Vol.43, No.6, pp.347-352 (2006).
- [9] 米本恭三, 他 (編), (臨床リハ別冊) リハビリテーションにおける評価 Ver.2, 医歯薬出版, pp.74-78 (2000).
- [10] 古荘純次, 中山健二, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.2, pp.186 (2006).
- [11] 古荘純次, 他, (解説) ロボット・VR および理学療法の技術を取り入れた上肢リハビリ支援システムによる訓練とその脳活動を含む評価, バイオメカニズム学会誌, Vol.33, No.2, pp.109-116 (2009).
- [12] 古荘純次, 森川隆浩 (解説) ER 流体・MR 流体を用いたリハビリ支援システム, 日本フルードパワーシステム学会誌, Vol.42, No.1, pp.12-15 (2011).
- [13] 小田邦彦, 他, VR 技術を用いた小脳性運動失調症を対象とする上肢動作評価・訓練システムの研究開発, VR 医学, Vol.12, No.1, pp.27-38 (2014).
- [14] 古荘純次, 活動機能回復装置の使われ方, 機構・制御方式とその Hazard および安全性評価, 平成 23 年度次世代医療機器評価指標作成事業 活動機能回復装置審査 WG 報告書 (次世代医療機器評価指標検討会 (厚生労働省)) pp.11-16 (2012).
- [15] J.Furusho,et al. ,Development of ER Brake and its Application to Passive Force Display, J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.13, No.7/8, pp.425-429, 2002.
- [16] 古荘純次, 小澤拓也, 他: “準 3 次元上肢リハビリ支援システム PLEMO-P3 の研究開発”, 日本リハ医学会学術集会, 1-4-21, (2009).
- [17] 小澤拓也, 古荘純次, 他: “脳卒中片麻痺患者に対する上肢リハビリテーション支援システム PLEMO-P3 の研究開発”, 機械学会論文集 (C 編), Vol.76, No.762, pp.323-330 (2010).
- [18] 古荘純次, (巻頭言) 上肢リハビリテーション支援ロボットとその本格的実用化, 総合リハビリテーション, Vol.38, No.12, (2010).

