解 説

パラレルメカニズムのハプティクス応用

Parallel Mechanisms in Haptics

荒 田 純 平* *名古屋工業大学

Jumpei Arata* *Nagoya Institute of Technology

1. は じ め に

パラレルメカニズムは、エンドエフェクタが複数の独立したアームで接続され、これらアームが閉ループを構成する機構と定義される [1]。パラレルメカニズムは 1940 年代後半から活発に研究開発がなされており、Gough platform (1947) [2], Stewart platform (1965) [3] などが有名である。さらに、1980 年代になりロボットの産業応用がより活発になるにつれ、Clavel の DELTA (1988) [4], Pierrot らの HEXA (1991) [5] などに代表されるように、パラレルメカニズムは広く応用されるに至った。本特集では、すでにパラレルメカニズムに関する様々な記事が寄稿されている。よって本稿では、特にパラレルメカニズムの力覚提示装置に代表されるハプティクスへの応用について解説したい。

2. ハプティックデバイス

ハプティックデバイスとは、操作者が物体に「触れた感覚」を提示する装置である。この「触れた感覚」には、力覚、振動覚、温覚、摩擦などがあり、これらの感覚を提示する装置のなかでも特に力覚提示装置（触覚提示装置と区別して kinesthetic haptic device と呼ばれる）について、パラレルメカニズムを応用する試みが広く行われている。本稿では、これらの取り組みについて紹介する。

力覚提示装置において、やわらかい、かたい物体の異なる力覚を実現することは重要である。言い換えると、力覚提示能力の優劣は、提示可能な力覚表現として理解される装置インピーダンスの帯域の幅 [6] [7] に強く依存しており、優れた力覚提示装置では広い帯域を有することが求められる。なお、ハプティクス、力覚提示装置に関する概説などについては文献 [8] などに詳しい。一般的には、優れた力覚提示装置には高い位置分解能、出力分解能に加えて、かたい対象物を提示する場合、高い剛性、出力が装置へ求め

られる。また、やわらかい対象物を表現するためには、滑らかで低慣性な動作が必要であり、よって高いバックドライバビリティと低慣性なメカニズム、またはその補償手法が求められる。

これらの性能を有する力覚提示装置の開発においては、主としてインピーダンス型力覚提示装置、アドミッタンス型力覚提示装置の二つのアプローチから研究開発が行われている。インピーダンス型では、光学式エンコーダなどからの位置を入力とし、出力として力を与える（位置入力-力出力）。よって、インピーダンス型では、メカニズムそのものに高バックドライバビリティ、低慣性が求められる。一方で、アドミッタンス型では、入力として力センサ信号を取得し、その大きさに応じて装置の位置を制御する（力入力-位置出力）。よって、アドミッタンス型では、メカニズム実装上の制約がインピーダンス型と比較して少ないものの、力センサによるフィードバック制御を行う必要がある。

3. パラレルメカニズムのハプティックデバイス応用

力覚を伴う訓練用シミュレーションなどの研究分野では、近年、デスクトップで扱うことが可能な比較的小型のインピーダンス型力覚提示装置が広く利用されている。この理由として、インピーダンス型力覚提示装置は、力センサを必要としないため比較的安価であり、安定した動作が行いやすい、などが挙げられる。

一般に、力覚提示装置の機構として関節構造を直列に連結したマニピュレータ型メカニズム（本稿ではパラレルメカニズムと対比してシリアルメカニズムと呼称する）を用いると、大きな動作域を実現することができる。しかし一方で、品質の高い力覚提示を行うには、十分な出力を有するアクチュエータを備える必要があり、シリアルメカニズムでは自重が大きくなることから、インピーダンス型力覚提示装置への実装には不利が生ずる。ここで、改めてパラレルメカニズムの特徴に着目する。パラレルメカニズムは、複数のアームによりエンドエフェクタを支持し、アクチュエータはロボット基底部に固定される特異な構造を有する。一般的にパラレルメカニズムの産業応用における利点としては、エンドエフェクタが複数のアームにより支持される

原 2011 年 11 月 30 日

キーワード: Parallel Mechanism, Haptics, Force Feedback Device

*〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町

*Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi

ため、負荷が分散し、剛性を得やすい高負荷・高剛性な点、複数のアームによりエンドエフェクタの位置誤差が平均化されるため、従来のシリアルメカニズムと比較すると誤差の累積がなく高精度である点、またすべてのアクチュエータが基底部へ固定されるため、メカニズム動作においてこれらは不動であり、よってエンドエフェクタは軽量、つまり低慣性であり高速動作性を有する点、などが挙げられる。

ここで、これらパラレルメカニズムの特徴を前章で述べた力覚提示装置に必要な特性と照らし合わせてみる。パラレルメカニズムは、重量の大きなアクチュエータを根元に配置可能であるため、比較的減速比の低く出力の高いアクチュエータを用いることが可能であり、高バックドライバビリティが実現できる。また、エンドエフェクタは軽量であるため、メカニズム本体重量により生ずる慣性力による力覚提示性能劣化が少ない。さらに、高出力のアクチュエータにより大きな出力が得られ、また高剛性なメカニズムにより、かたい対象物の提示が可能となる。このように、インピーダンス型力覚提示装置へのパラレルメカニズムの適用は、有効であると考えられる。

このような背景から、パラレルメカニズムのインピーダンス型力覚提示装置への応用が数多くなされている。しかしながらパラレルメカニズムの多くは従来のメカニズムと比較して、同等の機構サイズでも動作域が小さいという問題を有する。よって、パラレルメカニズムの力覚提示装置応用では、優れた力覚提示能力を有しながら、かつ応用に適した動作域を実現するメカニズム開発が重要となる。

4. 事例

前章で述べたように、パラレルメカニズムはインピーダンス型力覚提示装置としての応用が多く見られる。本章では、まずそれらの事例について紹介する。

Omega (Force Dimension 社, スイス) はパラレルメカニズムを応用した並進3自由度を有するインピーダンス型力覚提示装置であり、広くハプティクスの分野で利用されている [9]。同装置は、Clavel による DELTA [4] を基本とし、モータを配置した基底部を操作者に対して正面に配置することにより、アクセスしやすい動作域を構成し、またボールジョイントを用いない簡便な機構的構造についての工夫がなされている。DELTA は同様に Novint Falcon (Novint Technologies 社, 米国) [10] へ応用されている。同装置はさらに機械的な構成変更により、低価格な力覚提示装置を実現している。また、Clavel らの研究グループは、腹腔鏡下手術用シミュレーションのための力覚提示装置用パラレルメカニズムとして、PantoScope [11] を開発している。同メカニズムは、2 自由度の回転機構であり、回転中心を機構の外側に配置する RCM (Remote Center of Motion) を実装する点に特徴がある。同メカニズムは、腹腔鏡下手術

用シミュレーション装置 Xitact IHP/ITP として、製品化された [12]。岩田らによって開発された Haptic Master は、九つのモータにより並進3自由度、回転3自由度を有する冗長パラレルメカニズムにより構成されている [13]。また、岩田らは異なる構成によるパラレルメカニズムの力覚提示装置への応用について研究成果を報告している [14]~[16]。Pen-based force display system [15] もその一つであり、それぞれが接地された二つのパラレルメカニズムの組み合わせにより、従来パラレルメカニズムではアームの機械的干渉のため困難とされる広範囲の回転自由度を実装している。5 DOF Haptic Wand (Quanser 社, 米国) [17] は、パラレルメカニズムに基づく3自由度機構である 3-DOF Planar Pantograph を上記岩田らの Pen-based force display system と同様の手法で多重に配置し、5 自由度とした機構である。Birglen らは、回転3自由度を有する力覚提示装置として、球面状にリンク節を配置したパラレルメカニズムを応用した SHaDe [18] を開発した。SHaDe におけるパラレルメカニズムは、3 自由度回転パラレルメカニズム Agile Eye [19] を応用したものである。Adelstein らは、パラレルメカニズムにおける内部構造に10リンクを配置した3自由度を有する力覚提示装置を開発した [20]。Chablat らは、DELTA を直動駆動型へ拡張した3自由度パラレルメカニズムである Orthoglide [21] と3自由度回転パラレルメカニズム Agile Eye [19] を組み合わせた6自由度を有する力覚提示装置を開発した [22]。Virtuose 6D (Haption 社, 米国) は、6 自由度を有するパラレルメカニズムによる力覚提示装置である [23]。本装置では、単一のパラレル機構のみで並進・回転6自由度すべての自由度を実現している点に特徴がある。一方で、前述の Omega は、Omega.6/7 [9] として、Omega をベースに直列に回転機構を配置する方法で回転自由度を拡張している。さらに Haption 社は、一部にのみパラレルメカニズムを導入し、従来の関節を直列に配置するシリアルメカニズムとを組み合わせ、いわばハイブリッド型として構成した Virtuose 6D35-45 [23] を開発している。このように、パラレルメカニズムとシリアルメカニズムを組み合わせ装置を構成する例は、力覚提示装置として製品化された装置に多く見られる。代表的な例が、PHANTOM Premium 3.0 (SensAble Technologies 社, 米国) [24] である。同装置は、比較的大きな出力が必要となる基底部付近の自由度についてパラレルメカニズムの一要素である平行四角リンクを導入したハイブリッド型で構成している。Freedom 6S (MPB Technologies 社, カナダ) [25] も同じくハイブリッド型の6自由度メカニズムが導入された例である。同装置は Hayward の研究を基礎としており、Hayward はこれまでに力覚提示装置開発をはじめ、自由度構成についての詳細な検討を行っている [26]。このような応用は、CyberForce (Immersion 社, 米国) に

表 1 インピーダンス型力覚提示装置へのパラレルメカニズム応用例

Device	Mechanism	General description	Degrees of freedom	Ref.
Omega.3	Parallel	Based on DELTA [4]	3 trans.	[9]
Novint Falcon	Parallel	Based on DELTA [4]	3 trans.	[10]
PantoScope	Parallel	2 DOF spherical mechanism	2 rot.	[11]
Xitact IHP/ITP	Parallel	Based on PantoScope [11]	3 rot. + 1 linear	[12]
Haptic Master	Parallel	Redundant parallel mechanism	3 trans. + 3 rot.	[13]
Pen-based force display	Parallel	2 set of 3 DOF manipulators	3 trans. + 3 rot.	[15]
3-DOF Planar Pantograph	Parallel	2 pantographs	2 trans. + 1 rot.	[17]
5-DOF Haptic Wand	Parallel	Using a dual-pantograph arrangement	3 trans. + 2 rot. + 1 passive rot.	[17]
SHaDe	Parallel	Based on Agile Eye spherical mechanism	3 rot.	[18]
3 DOF parallel hand	Parallel	10-Link, 12 revolute-joint mechanism	3 trans.	[20]
Virtuose 6D Desktop	Parallel	6 DOF parallel mechanism	3 trans. + 3 rot.	[23]
DELTA-R	Parallel	DELTA-R redundant parallel mechanism	3 trans.	[28]
D-8	Parallel	Multi-DOF parallel mechanism based on DELTA-R	3 trans. + 2 rot. + 1 passive rot.	[29]
6 DOF haptic device	Hybrid	Orthoglide + Agile Eye	3 trans. + 3 rot.	[22]
Virtuose 6D35-45	Hybrid	2 parallelograms	3 trans. + 3 rot.	[23]
PHANTOM Premium 6 DOF	Hybrid	A parallelogram with a manipulator	3 trans. + 3 rot.	[24]
Freedom 6S	Hybrid	A parallelogram + 3 DOF wire mechanism	3 trans. + 3 rot.	[25]
CyberForce	Hybrid	A parallelogram	3 trans. + 3 rot.	[27]

についても同様に見られる。CyberForce はワイヤメカニズムによる手指部の力覚提示が可能な CyberGrasp との組み合わせでより多彩な力覚提示が可能である [27]。なお、筆者は DELTA を冗長パラレルメカニズムに拡張し、より小型・広動作域を実現した DELTA-R [28]、またこれを多重に配置し、多自由度化を施した D-8 [29] を開発している。ここまで述べた、パラレルメカニズムのインピーダンス型力覚提示装置への応用について、それぞれのメカニズム概要、自由度構成などを表 1 にまとめる。

ここまで、インピーダンス型力覚提示装置へのパラレルメカニズム応用について、事例を述べた。一方で、アドミッタンス型力覚提示装置についても、これまでにいくつかの報告がなされている。妻木らは、改良型 DELTA による 3 自由度並進機構、5 リンク球面ジンバルによる 2 自由度回転機構、1 自由度回転機構を直列に接続することにより構成した 6 自由度パラレルメカニズムについて、アドミッタンス制御による動作を可能としている [30]。また、Moog Dental Trainer (Moog 社, 米国) [31] は、小型パラレルメカニズムをアドミッタンス制御することにより柔軟な機構配置を可能とし、かつ優れた力覚提示能力を実現した例である。

5. その他の手法による力覚提示装置メカニズム

パラレルメカニズム以外の手法を用いた力覚提示装置に関しても活発に研究開発が行われている。本稿の主旨をより理解してもらうためにも有益であると思うので、以下にその一部を紹介する。

まず、パラレルメカニズム以外を用いた代表的なアドミッタンス型力覚提示装置として、MOOG FCS HapticMaster

(Moog 社, 米国) [31] がある。本装置は、直動 2 軸、回転 1 軸を直列に配置した機構で構成されており、ボールねじなどの高いインピーダンスを発生可能な機械要素から構成されているため、発生可能な出力が大きい特徴がある。また、Ueberle らの開発した Vishard 6/10 は、マニピュレータ型アームを用いて力覚提示装置を構成している [32] [33]。

一方、ワイヤメカニズムを応用した力覚提示装置は、これまでに多く報告されている。特に操作端を複数のワイヤにより駆動されるパラレルワイヤメカニズムは、ワイヤによる動力の伝達が引張力にのみ限定されるため、パラレルメカニズムとは機構原理を異にするものであるが、操作端である機構終端部が複数の駆動手段により支持される点で共通点がある。代表的な例として、佐藤らはこれまで SP-IDAR [34] をはじめ、多数のパラレルワイヤメカニズムによる力覚提示装置を開発している。誌面の都合上、十分な事例が紹介ができないのが残念であるが、いくつかの研究開発事例として、参考文献 [35]～[41] を参照されたい。

さらには、磁力を使った力覚提示装置として、Maglev 200 (Butterfly Haptics 社, 米国) [42] がある。磁力を応用する原理上、出力、動作域が他の手法と比較して小さいが、操作端が浮遊するため高いバックドライバビリティを有する特徴がある。

6. お わ り に

パラレルメカニズムはその特異的な構造から、一般的な産業用途以外の分野での特殊な要求仕様へ分化・特化した新たな機構についての研究開発が期待される。ハプティクス分野での力覚提示装置などもその一分野であろうと考える。今後もより多くの研究者がパラレルメカニズムの魅

力的な動作に着目し、多くの分野での応用が一層活発に進展することを願っている。本稿では、パラレルメカニズムがなぜ力覚提示装置への応用に際して優位性を有するのか、またその研究開発事例について誌面の許す限り挙げ、その特徴についてまとめた。本稿で紹介した内容が、ハプティクス分野における力覚提示装置に関する研究開発に際して、有用な情報となれば幸いである。

参 考 文 献

- [1] J.P. Merlet: Parallel Robots Second Edition. Springer, 2006.
- [2] V.E. Gough: "Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance," Proc. of Auto Div. Inst. Mech. Eng. vol.171, pp.392-395, 1956-1957.
- [3] D. Stewart: "A Platform with Six Degrees of Freedom," Proc. of the Institution of Mechanical Engineers 1965-1966, vol.180, part 1, no.15, pp.371-386, 1965.
- [4] R. Clavel: "DELTA, a fast robot with parallel geometry," 18th Int. Symp. on Industrial Robot, pp.91-100, 1988.
- [5] F. Pierrot, M. Uchiyama, P. Dauchez and A. Fournier: "A New Design of a 6-DOF Parallel Robot," J. of Robotics and Mechatronics, vol.2, no.4, pp.308-315, 1991.
- [6] J.E. Colgate, M.C. Stanley and G.G. Schenkel: "Dynamic Range of Achievable Impedances in Force Reflecting Interfaces," Proc. of SPIE vol.2057, pp.199-210, 1993.
- [7] J.E. Colgate and J.M. Brown: "Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display," Proc. of IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, pp.3205-3210, 1994.
- [8] M.H. Zadeh: Advances in Haptics. InTech, 2010.
- [9] Force Dimension, <http://www.forcedimension.com/>
- [10] Novint Technologies, <http://home.novint.com/>
- [11] R. Baumann, W. Maeder, D. Glauser and R. Clavel: "The PantoScope: A Spherical Remote-Center-of-Motion Parallel Manipulator for Force Reflection," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1997, pp.718-723, 1997.
- [12] Mentice, <http://www.mentice.com/>
- [13] Haptic Master, http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/vrlab_web/hapticmaster/hapticmaster.e.html
- [14] H. Iwata: "Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator," Computer Graphics, vol.24, no.4, pp.165-170, 1990.
- [15] H. Iwata: "Pen-based Haptic Virtual Environment," IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, pp.287-292, 1993.
- [16] H. Iwata, H. Yano and W. Hashimoto: "LHX: An Integrated Software Tool for Haptic Interface," Computer and Graphics, vol.21, no.4, pp.413-420, 1997.
- [17] Quanser, <http://www.quanser.com/choice.asp>
- [18] L. Birglen: "SHaDe, a new 3-DOF haptic device," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.18, no.2, pp.166-175, 2002.
- [19] C. Gosselin and J.F. Hamel: "The agile eye: a high performance three-degree-of-freedom camera-orienting device," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.781-787, 1994.
- [20] B.D. Adelstein, P. Ho and H. Kazerooni: "Kinematic Design of a Three Degree of Freedom Parallel Hand Controller Mechanism," ASME Dynamic System and Control Division, DSC-vol.58, pp.539-546, 1996.
- [21] D. Chablat and P. Wenger: "Architecture Optimization of a 3-DOF Parallel Mechanism for Machining Applications, the Orthoglide," Proc. of IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.19, no.3, pp.403-410, 2003.
- [22] D. Chablat and P. Wenger: "A Six Degree-Of-Freedom Haptic Device Based on the Orthoglide and a Hybrid Agile Eye," Proc.

- of ASME International Design Engineering Technical Conferences, abs/0707.3550, 2006.
- [23] Haption, <http://www.haption.com/site/index.html>
- [24] SensAble Technologies, <http://www.sensable.com/>
- [25] MPB Technologies, <http://www.mpb-technologies.ca/>
- [26] V. Hayward: "Toward a seven axis haptic device," Proc. of Intelligent Robots and Systems pp.133-139, 1993.
- [27] Immersion, <http://www.immersion.com/>
- [28] J. Arata, H. Kondo, N. Ikedo and H. Fujimoto: "Haptic Device using a newly developed Redundant Parallel Mechanism," IEEE Trans. on Robotics, vol.27, no.2, pp.201-214, 2011.
- [29] J. Arata, N. Ikedo and H. Fujimoto: "New multi-DOF haptic device using parallel mechanism with a wide range of rotational working area," Advanced Robotics, vol.26, no.3-4, pp.121-135, 2012.
- [30] Y. Tsumaki, H. Naruse, D.N. Nenchev and M. Uchiyama: "Design of a Compact 6-DOF Haptic Interface," Proc. of Int. Conf. of Robotics and Automation, pp.2580-2585, 1998.
- [31] Moog, <http://www.moog.com/>
- [32] M. Ueberle and M. Buss: "Design, control, and evaluation of a new 6 DOF haptic device," Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and System, pp.2949-2954, 2002.
- [33] M. Ueberle and N. Mock: "VISHARD10, a Novel Hyper-Redundant Haptic Interface," Proc. of the Int. Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.58-65, 2004.
- [34] L. Buogiuila, Y. Cai and M. Sato: "New Haptic Device For Human Scale Virtual Environment Scalable-SPIDAR," Proc. of Int. Conf. on Artificial Reality and Telexistence, pp.93-98, 1997.
- [35] CyVerse, <http://www.cyverse.co.jp/>
- [36] Mimic Technologies, <http://www.mimic.ws/>
- [37] S. Kawamura and K. Ito: "A New Type of Master Robot for Teleoperation Using A Radial Wire Drive System," Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems pp.55-60, 1993.
- [38] R.J. Adams, D. Klowden and B. Hannaford: "Stable Haptic Interaction using the Excalibur Force Display," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.770-775, 2000.
- [39] C. Bonivento, A. Eusebi, C. Melchiorri, M. Montanari and G. Vassura: "WireMan: A Portable Wire Manipulator for Touch-Rendering of Bas-Relief Virtual Surfaces," Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics, pp.13-18, 1997.
- [40] N. Hirose, K. Hirota, T. Ogi, H. Yano, N. Kakehi, M. Saito and M. Nakashige: "HapticGEAR: the development of a wearable force display system for immersive projection displays," Proc. of IEEE Int. Conf. on Virtual Reality, pp.123-129, 2001.
- [41] J.V. Zitzewitz, G. Rauter, R. Steiner, A. Brunschweiler and R. Riener: "A versatile wire robot concept as a haptic interface for sport simulation," Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.313-318, 2009.
- [42] Maglev 200, <http://butterflyhaptics.com/>

荒田純平 (Junpei Arata)

2004年東京大学大学院産業機械工学専攻博士課程修了。2007年より名古屋工業大学助教、現在に至る。1998~2001年にかけて2年間、スイスEPFLにて研究助手としてパラレルメカニズムなどの研究に携わる。2010年9月~12月、スイスETH Zurich客員教員。これまでにパラレルメカニズム、コンプライアントメカニズムを応用した手術支援システムなどの医療ロボット、力覚提示装置、産業ロボット等の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)