

バイオメカトロニクスから 生体レジリエンスへ

—問題解決のためのデザインサイエンス—

我妻 広明 笠井 慎太郎
九州工業大学 九州工業大学



1. はじめに

1940年代にWiener [1]により、情報通信や制御が生体や社会の営みに介入可能であると提唱されたCyberneticsは、機械と人間の融合「サイボーグ」の基盤理論を示した。1990年代、Pfeiferら [2]を中心に身体性(Embodiment)が議論され、身体の構造と制御、環境との相互作用で、特定の目的を達成する知的ロボットの設計原理が示された [3]。2010年には、Biomechatronicsが、生体-機械-電子工学の融合研究領域として形成され、Herr [4]を旗手とするMIT Media Labの活躍がある。彼自身、脚部を損失し、電子制御の「バイオニック義足」を完成、2013年のボストンマラソン爆破事件で脚を失ったダンサーが再び踊れるというデモンストレーションをTED [4]で行い、サイボーグ時代の幕開けとなった。

2. ロボティクス宿命のジレンマ

バイオニック義足実現の光と影は、デュアルユースにある。米国は大戦後軍用研究の民生利用には肯定的で、ベトナム反戦活動で否定論が出たが、軍事大国としての構造上、従来価値観に戻った [5]。MITとスタンフォード大学では、1969年に軍事研究への大規模抗議があり、その後軍からの研究予算が低減したが、揺り戻して、1983年MITの電子工学分野の82%が国防総省(DOD)予算となった [5]。Herrも医学の進歩として、DOD支援を容認する [6], [7]。対照的にロボットスーツHALを開発した山海嘉之 [8]は、軍事利用を否定し、国内ロボット研究者の模範である。近年議論は複雑化し [9]、資金の出自や研究者の意図による判別は困難とされる。一方、昨今話題の政治家と宗教団体との関係同様、出元を知らなかった、意図しなかったとの釈明が免罪符となれば、日本学術会議声明「科学者の行動規範」 [10]が形骸化する。ゆえに、米物理学

者の原爆贖罪意識に倣い、研究者が、自身の研究成果が軍事利用される可能性を常に意識することが重要である [11]。

根本的な問題は、ロボティクス研究が一般に高額な研究資金を必要とする点にある。身体機能の模擬や装着を課題とすれば、小型の電子回路を機構に組み込み、高精度かつ高速の検知や電動を実現する必要がある、最新機器のシステム設計が試作の段階でも極めて高額になることは避けられない。

3. 数理・情報・材料科学による革新

航空・宇宙技術で必須の多体力学では、Kane型運動方程式がNASAの中心技術の一つ [12]で、Haug [13], Nikravesh [14]らの一般定式化を経て、Multibody Dynamics (MBD) が学問分野となり、Multibody System Dynamics 誌 [15]が1997年より刊行された。以後、機械設計・制御に留まらず、身体欠損や機能障害の治療・リハビリのための身体力学分析・支援機器設計に応用されている [16], [17]。柔軟素材を機構に組み込んだ動力学解析は、Shabana [18]の絶対節点座標法(ANCF)で可能になり、大変形時の有限要素法の難題解決に寄与した。国内のMBDの理解は、基礎理論・応用の教科書 [19]が2006年に刊行されて進んだ。商用ソフトウェアの米国製Ansys, MATLABには、ブラックボックスとして同機能が組み込まれている。近年のオープンソースソフトウェアの潮流は、1980年代のカリフォルニア大学から生まれたBSDライセンスやMITライセンスから始まり、米国シリコンバレーで人工知能(AI)技術の起業や投資が加熱した2015年頃には、オープンソース公開サイトGitHubで、商用使用を可とするMITライセンス [20]が主となった。以後AIフレームワークが採用したPythonが科学計算の商用利用を促進し、大企業

がライセンスを掌握・席卷する時代から脱却し、ビジネスモデル多様化が始まる。

更に3D印刷技術と材料工学の進歩が、従来の電子制御に依拠するシステム設計を変革していく。

4. 社会ニーズとデザイン科学

柔軟素材の一体成形において、内包する各構造を適切に設計し、多くの機構部品を代替可能にするコンプライアントメカニズム (CM) 理論 [21] が2001年に示され、国内でも医療部品として注目された [22]。CMの機能性は、破壊を伴うとして忌避される座屈現象を積極的に組み込んで得られる非線形性である。弾性体の反発力は変形量に対し、 kx (定数 k) の線形力に留まる。力の蓄積・維持・解放を「機能」と合致させるため、数理科学とデザイン科学の融合による動力学・逆動力学の機能評価に加え、破壊・破断の耐久性評価が必要であり、従来のトポロジー最適化だけでは限界があった。事実、CM実用・商業化は3D印刷技術が整った2020年からである [23]。金属並みの剛性は炭素繊維複合材 (CFRP) で得られ、スポーツ義足で活用されてきた [24]。近年は、炭素繊維を射出成形可能な3D印刷も実現し、生体が必要とする機能と力を評価するバイオメカニクスとの融合で、スポーツのみならず、高齢者・障害者支援具など社会ニーズでの活用が期待される [25]。

5. まとめ

本稿では高額な資金を要したロボティクスを、ものづくりのソフトウェア化と数理・情報科学の連携が革新する潮流を示した。生体の回復力の時間軸を考慮すれば、治療やリハビリ臨床での活用も広がる [16], [17]。マスから個別のニーズに合わせた設計・生産へ移行するデザインの時代に入った。

参考文献

- [1] N. Wiener, The MIT Press, 1948.
- [2] R. Pfeifer, M. Lungarella, and F. Iida, "Embodiment," *Science*, vol.318, pp.1088–1093, 2007.
- [3] 細田 耕, "ソフトロボティクス," *日本ロボット学会誌*, vol.37, no.1, pp.7–11, 2019.
- [4] H. Herr, TED2014, 2014.3.
- [5] 喜多千草, "軍事研究," *科学・技術・社会*, vol.26, pp.103–126, 2017.
- [6] J. Levin, Pioneer Works Broadcast, *Cybernetics*, 11.04.21, 2021.
- [7] Department of Defense, The PBS documentary, *Augmented*, March 3, 2022.
- [8] 山海嘉之, プロフェッショナル 仕事の流儀, 第221回, NHK, 2014.1.20, 2014.
- [9] D. Cyranoski, "Japanese academics," *Nature*, vol.521, pp.13–14, 2015.
- [10] 日本学会会議, 声明「科学者の行動規範—改訂版—, 2013.1.25, 2013.
- [11] 杉山滋郎, "軍事研究," *科学技術コミュニケーション*, vol.19, pp.105–115, 2016.
- [12] E.T. Stoneking, "Implementation of Kane's Method," *AIAA* 2013-4649, 2013.
- [13] E.J. Haug, "Computer Aided Kinematics," Pearson College Div, 1989.
- [14] P.E. Nikravesh, "Planar Multibody Dynamics," CRC Press, 2007.
- [15] K. Komoda and H. Wagatsuma, "Energy-efficacy comparisons," *Multi. Sys. Dyn.*, vol.40, pp.123–153, 2017.
- [16] Dachkinov, et al., "Flexible Bar Geometric Designs," *JRNAL*, vol.9, no.1, pp.59–65, 2022.
- [17] Kasai, et al., "A MBD-based Knee Link Model," *JRNAL*, vol.9, no.2, pp.128–135, 2022.
- [18] A.A. Shabana, "Flexible Multibody Dynamics," *Multi. Sys. Dyn.*, vol.1, pp.189–222, 1997.
- [19] 日本機械学会, "マルチボディダイナミクス (1), (2)," コロナ社, 2006, 2007.
- [20] MarkeZine ニュース, "[MIT ライセンス]," 2015.03.11, 2015.
- [21] L.L. Howell, *Compliant Mechanisms*, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [22] 小林正和, 他, *精密工学会誌*, vol.71, no.11, pp.1464–1469, 2005.
- [23] 八木沢篤, TCT Japan 2020, MONOist, IT-media, 2020.1.31, 2020.
- [24] 遠藤 謙, "テクノロジー視点で見た競技用義足," *日経 XTECH*, 2016.9.12, 2016.
- [25] 遠藤 謙, "身体化する義足," *MATLAB EXPO*, 2019.6.20, 2019.