

拮抗腱駆動と骨格間力覚に基づく 生体規範開放関節の提案

○中島慎介（東京大学） Qi AN（東京大学） 山下淳（東京大学） 浅間一（東京大学）

1. 序論

脚移動ロボットにおける衝撃耐性の実現は、その運動性能や運動継続能力の向上に直接的に貢献する。その実現を目指し、身体構造設計や駆動系統の洗練などの多くの探究がなされている。ヒトをはじめ、生物における関節構造の特徴として、一般のロボットとは異なる開放関節であり、靭帯や関節包、筋が運動を拘束することが知られている [1]。このような構成を取ることにより、関節面で荷重を受け止め、優れた運動性と安定性を両立することが可能となる。本研究では、このような開放関節を脚ロボットに搭載し、その衝撃耐性を向上させることを目的とする。

開放関節の工学的再現は、主に人工関節分野において取り組まれている。金属骨頭とポリエチレン臼蓋で構成された人工関節が、力学的特性や生体親和性などから活用されている。また、ロボットへの搭載を目論んだ諸々のトライアルが存在し、柴田らの取り組み [2] 以来、特に肩関節と膝関節において豊富な事例が存在する。例えば肩関節において、ボールジョイントを二重に重ねる方式 [3] や三角筋を模したモータ駆動腱で拘束する方式 [4]、天然ゴム製の関節包を備える方式 [5] などがある。そして膝関節において、関節頭を樹脂で構築し、左右にばねでできた靭帯を持たせその張力から関節角度を推定させる試みが存在する [6]。また、布を用いた靭帯により終末強制回旋機構を実現した事例が見られる [7]。他に、ヒト指構造の再現を目指したクローシェの靭帯を備えるハンドが開発され、粘弾性などの再現に成功している [8]。そして、脚ロボットの各々の関節をこのような面接触関節とすることにより、優れた耐衝撃性を実現するアプローチが空気圧駆動筋骨格ロボットにおいて行われてきた [9]。

生物の開放型関節においては、筋を始めとする能動安定化器、靭帯や関節包の受動安定化器の存在により関節が脱臼すること無く可動することが指摘されている。ロボット分野においては、受動安定化器の役割に注力した研究が中心であり、能動安定化器の役割に注目した研究は柴田らの研究にとどまっている。なお、脱臼の発生に至る尺度の設定に着目したものはLauらによる関節間力/モーメントを用いた逆動力学演算の研究が存在する [10]。本研究では、従来ロボット分野においてしばしば合力としてとらえられるか存在が看過されていた関節間力に注目し、その圧力中心をフィードバックすることで開放型関節を脱臼すること無く運動させることを目的とし、実現のためのシステム構成を示す。

本論文は以下のように構成される。第2節では、生体関節における関節内神経系の安定化への貢献について説明し、ロボット関節における関連研究と本研究の貢献を明らかにする。第3節では、等身大脚ロボット用に構

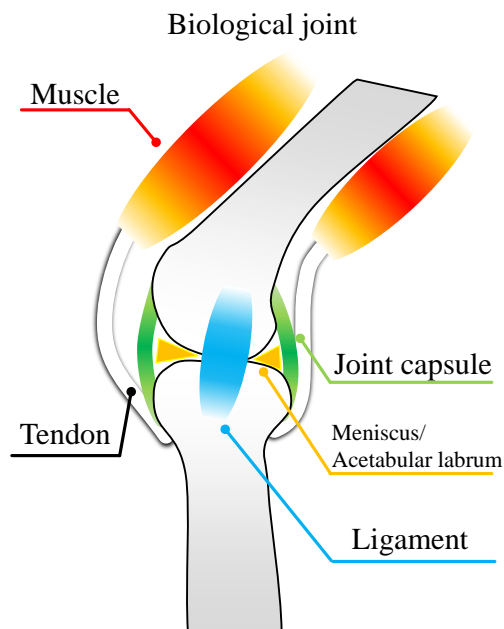


図1 生体関節の模式図。各々の組織に、機械的負荷に反応する受容器が配置されている。

築した開放型関節の設計と実装に関して説明する。第4節では、提案関節の負荷支持計測能力と可動域に関して、シミュレーションと実機予備実験にて検証する。最後に、5節で結論と展望を述べ、本論文を締めくくる。

2. 骨格間力覚

2.1 生物関節における機械受容器

ヒト関節部において、関節を構成する各々の組織の機械受容器の存在が指摘されている (図1)。例えば、靭帯にはゴルジ腱器官様の張力反応構造、関節包などにはパチニ/ルフィニ小体様の変位反応構造が存在する。特に、肩関節や股関節などの球関節や膝関節などの脱臼可能性が大きいと思われる関節には、半月板や関節唇といった弾性体構造が封入され、それらは共に機械受容器を備える。これらの存在が、関節における骨格間の接触力を伝え、そして安定化に寄与するという仮説が、関節の動的安定化機構として知られている [11]。本研究では、この仮説に則り、関節間に骨格間に伝達される接触力の力覚、以下“骨格間力覚”を搭載することで脱臼に係る情報の計測を試みる。

2.2 ロボット分野における応用

なお、関節部に圧力センサを搭載する手法は特にバイオメカニクス分野でなされており、関節置換術におけ

るアライメントの調整や摩耗評価に役立てられている [12, 13, 14]. また, ロボット手首関節における姿勢・トルク推定の事例などが存在する [14] が, 特に等身大ロボットなどを指向する高負荷状態での脱臼状態評価は未だ挑戦的な課題であると考えられる. 本研究では, 球関節等への小型ロードセル搭載による解決に取り組む.

3. 提案構成

提案する骨格間力覚コンポーネントについて説明する (図 2). 関節ソケット部の直下に, 圧縮力計測用のロードセルを搭載させる. 圧縮力計測用ロードセルは, 自重に対して非常に大きな負荷力を支持計測できる利点を有する. ロードセルを複数搭載することで圧力中心を計測させることが可能となると考えられる. なお, 提案構成は開放関節における活用と前提としている. すなわち, 従来の軸駆動ロボットでは駆動は困難であり, モータ駆動腱等による拮抗腱駆動の採用が必須と考えられる. 拮抗腱駆動により発生する内力は, 開放関節を拘束するための圧縮力として利用される.

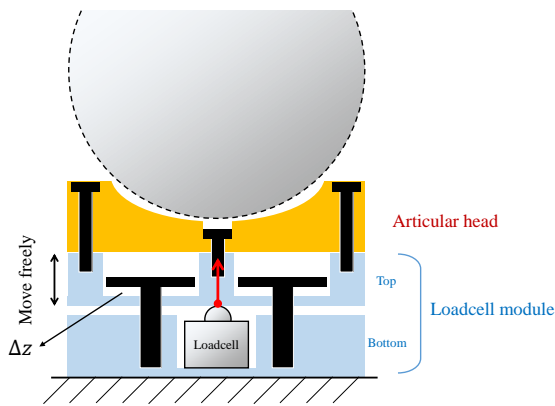


図 2 骨格間力覚システムの模式図. ソケット (白蓋) 部に複数のロードセルが内蔵され, 関節における圧縮力や圧力中心を検知する.

骨格間力覚コンポーネントの実機概要図を示す (図 3). 球関節と接触する半透明の凹形状部品は, 光造形樹脂を活用した RP (Rapid Prototyping) により作製した他, 周辺部品はポリアセタール樹脂の切削部品により構成した. ロードセル部として, 当該接触部の直下に最大定格 500 [N] のボタンロードセルを 4 つ搭載する. 部材同士が微小な空隙をもつねじ結合によって締結されることで, ロードセルに圧縮力が伝達される仕組みとなっている. アセンブリの状態では外力印加箇所の変化に応じてセンサ出力が変化することを確認し, 当該アセンブリを基にシミュレーションモデルを構築した.

4. 計算機シミュレーション

提案する開放関節を用いた動力学シミュレーションについて説明する. シミュレータとして, “MuJoCo” [15] を用いた. 特に腱駆動機構を扱う上での経路計算などの機能の充実と, 将来的に多関節モデルへの拡張を目論み選定した. また, 本研究で取り扱う開放関節モデルは, 一見球関節としての挙動を示す一方で, 一般の球関節と異なり変位の拘束を持たない点が異なる. そこで,

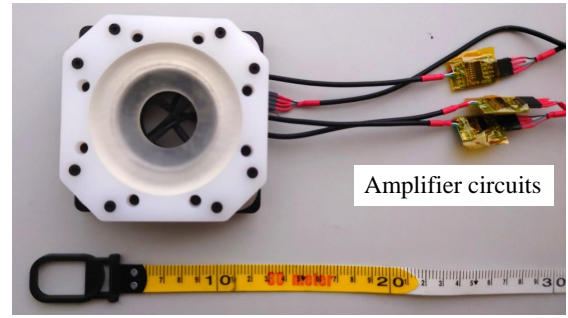


図 3 ソケット部の実機プロトタイプ.

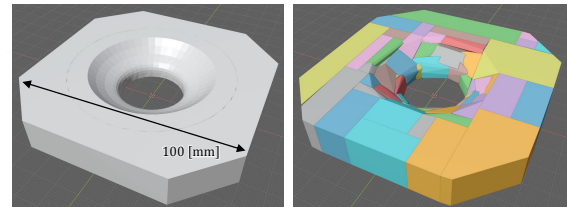


図 4 ソケット部における Convex decomposition (凸包分解) の結果.

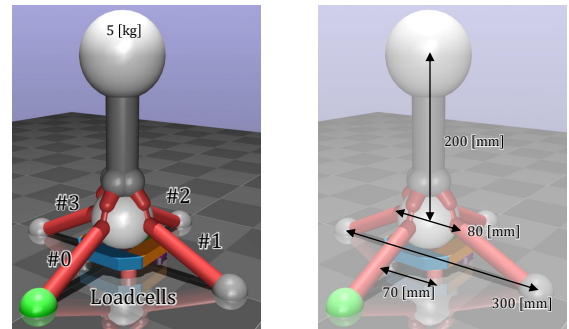


図 5 開放関節のシミュレーションモデル. 左) 4 本のワイヤによる拮抗腱駆動関節であり, ロードセルを 4 つ備える. 右) 主要部の寸法.

実装段階では, 一切の拘束を持たない “Free Joint” として実装した. また, ソケット部のような凹形状での衝突判定を簡易にすべく, 凸包分解ライブラリ [16] を活用し, 64 の凸包へ分解するなどの前処理を行った (図 4). シミュレーションモデルを 図 5 に示す. 4 本の筋アクチュエータにより駆動される開放球関節であり, ソケット部の下に 4 つの 3 軸力センサを備える. 実機を想定し, 鉛直方向の力のみを情報処理に活用した.

可動域と圧力中心取得の検証の為, おもりの挙上シミュレーションを行った. 関節角度の初期値を $[0.0 - \frac{\pi}{4} 0.0]$ に設定し, 1 つの筋アクチュエータを収縮させることで, おもりを挙上させた. おもりの挙上の進行にともない, 圧力中心の前後座標が, 0.03 [m] から 0.0 [m] に減少していることがわかる. すなわち, 圧力中心がソケット部中心への移動が確認された. これにより, 骨格間力覚システムにより, 関節間圧力中心を取得できる可能性が示唆された.

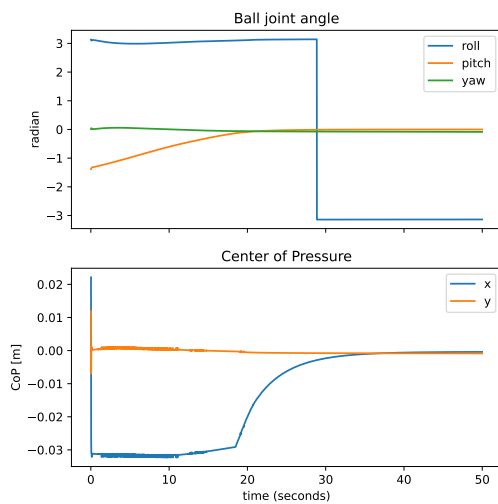


図6 おもり挙上動作のシミュレーション結果。アクチュエータの駆動によりおもりが引き上げられた結果、関節ピッチ角度が減少し、それに伴い圧力中心も中心へと移動していることが分かる。

5. 結論

本研究では、骨格間力覚を搭載する生体規範開放関節の開発に取り組み、アプローチの有効性を、計算機シミュレーション検証した。今後の課題として、提案関節構造へのモータ駆動腱の付与による単体評価及び実ロボット搭載による骨格間力覚の有効性検証を挙げる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 22K17973 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Pamela K Levangie and Cynthia C Norkin. Joint structure and function: a comprehensive analysis. 3rd. Philadelphia: FA. Davis Company, 2000.
- [2] M. Shibata, T. Yoshimura, and S. Hirai. Loosely coupled joint driven by sma coil actuators. In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4460–4465, April 2007.
- [3] Kenji Urai, Yoshihiro Nakata, Yutaka Nakamura, and Hiroshi Ishiguro. Development of a large moving range shoulder joint for a humanoid robot. *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 34, No. 9, pp. 623–630, 2016.
- [4] Toyotaka Kozuki, Hironori Mizoguchi, Yuki Asano, Masahiko Osada, Takuma Shirai, Junichi Urata, Yuto Nakanishi, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Design methodology for thorax and shoulder of human mimetic musculoskeletal humanoid kenshiro -a thorax with rib like surface-. pp. 3687–3692, 10 2012.
- [5] Ayaka Fujii, Shinsuke Nakashima, Masaya Kawamura, Kento Kawaharazuka, Shogo Makino, Yuki Asano, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Development and functional evaluation of a deformable membrane capsule for an open ball glenohumeral joint. pp. 853–858, August 2018.
- [6] Felix Russell, Yipeng Zhu, William Hey, Ravi Vaidyanathan, and Peter Ellison. A biomimicking design for mechanical knee joints. *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 13, No. 5, p. 056012, aug 2018.
- [7] Moritaka Onitsuka, Manabu Nishiura, Kento Kawaharazuka, Kei Tsuzuki, Yasunori Toshimitsu, Yusuke Omura, Yuki Asano, Kei Okada, Koji Kawasaki, and Masayuki Inaba. Development of musculoskeletal legs with planar interskeletal structures to realize human comparable moving function. In *2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 17–24, 2021.
- [8] Z. Xu, Y. Matsuoka, and A. D. Deshpande. Crocheted artificial tendons and ligaments for the anatomically correct testbed (act) hand. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (RO-BIO)*, pp. 2449–2453, Dec 2015.
- [9] Koh Hosoda, Yuki Sakaguchi, Hitoshi Takayama, and Takashi Takuma. Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure. *Autonomous Robots*, Vol. 28, No. 3, pp. 307–316, Apr 2010.
- [10] Darwin Lau, Denny Oetomo, and Saman K Halgumuge. Inverse dynamics of multilink cable-driven manipulators with the consideration of joint interaction forces and moments. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 31, No. 2, pp. 479–488, 2015.
- [11] Nikolaus Wuelker, Marco Korell, and Karsten Thren. Dynamic glenohumeral joint stability. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, Vol. 7, No. 1, pp. 43–52, 1998.
- [12] Feng-Xia Wang, Zhi-Yong Wu, Qi-Hang Lin, Tao Chen, Shao-Long Kuang, Min-Feng Gan, Li-Xin Huang, and Li-Ning Sun. Novel force measurement system for soft tissue balance in total knee arthroplasty based on flexible pressure sensor arrays. *Advanced Intelligent Systems*, Vol. 4, No. 4, p. 2100156, 2022.
- [13] Fumika Tanabe, Shusuke Yoshimoto, Yuki Noda, Teppei Araki, Takafumi Uemura, Yoshinori Takeuchi, Masaharu Imai, and Tsuyoshi Sekitani. Flexible sensor sheet for real-time pressure monitoring in artificial knee joint during total knee arthroplasty. In *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 1591–1594, 2017.
- [14] Seongseop Yun, Namho Kim, and Dongjun Shin. A contact joint sensor using a force-sensor module embedded in a 3d curved surface. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, No. 1, pp. 867–878, 2022.
- [15] Emanuel Todorov, Tom Erez, and Yuval Tassa. Mujoco: A physics engine for model-based control. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5026–5033, 2012.
- [16] Khaled Mammou. Voxelized hierarchical convex decomposition - v-hacd version 4. <https://github.com/kmammou/v-hacd>, 2022.