

短下肢装具のための剛性切替構造に関する検討

Note on switching stiffness structure for ankle-foot orthosis

○ 和田康一郎(阪大) 内藤尚(阪大) 松本健志(阪大) 田中正夫(阪大)

Koichiro WADA, Osaka University
 Hisashi NAITO, Osaka University
 Takeshi MATSUMOTO, Osaka University
 Masao TANAKA, Osaka University

Abstract: In this study, discussed is a concept of ankle-foot orthosis (AFO) that is able to alter the joint stiffness in accordance with the change of walking phase. The higher AFO stiffness is expected for the swing phase to guarantee the foot clearance, and the lower stiffness is for the early stance phase to enabling smooth transition from the heel strike to the foot flat. The ground reaction force working at the heel is employed as the switch input to alter the AFO stiffness. The joint structure with internal boundary, whose closure is for higher stiffness and open is for lower stiffness, is provided for a shoehorn AFO, and the compliant mechanism is combined to adjust the open-close of internal boundary depending on the presence-absence of ground reaction at the AFO heel. In the context of structural optimization, the shape determination of joint structure and compliant mechanism is considered, and test problem is demonstrated.

Key Words: Shoehorn Ankle-foot orthosis, Switching stiffness, Joint structure, Compliant mechanism

1. まえがき

脳卒中片麻痺者における運動障害においては、下肢の随意運動に不自由があり、原因は異なるが足関節が不随意に底屈位となる尖足や下垂足はその代表例である。不随意の底屈位は、歩行の遊脚期中に、つま先と歩行面とのフットクリアランスの確保を困難とし、つまずきなどのリスクとなる。このような足関節の底屈角度を制限し、歩行を補助するために短下肢装具(Ankle Foot Orthosis, 以下 AFO)が多く処方されている。AFOには、足関節の不随意の底屈抑制のための十分な剛性が求められる。その一方で、高い AFO 剛性は足関節運動の過剰拘束をもたらす。このような観点から歩行の各相に応じた適切な抵抗を足関節に付与できる AFO の必要性が明らかとなっている⁽¹⁾。なめらかな足底接地からつま先離地までに求められる足関節背屈はすでに実現されてきているが、立脚初期の踵接地から足底接地に至る滑らかな足関節底屈が強く妨げられるという問題点⁽²⁾についての検討は限られているのが現状である。

本報では、遊脚期においては足関節の底屈を十分に制限できる高い剛性を、立脚初期においては滑らかな底屈運動を妨げない低い剛性を可能とするシューホーン AFO を目指し、歩行相に応じて AFO 関節剛性の切替を可能とする構造について、最適構造設計法によるアプローチから検討する。

2. シューホーン型 AFO 関節構造

遊脚期から立脚期への移行は踵接地で特徴づけられることから、遊脚期に AFO に必要とされる十分な剛性(以降、高剛性)から、足関節の底屈モーメントにより立脚初期に AFO が底屈できる剛性(以降、低剛性)への移行を、踵接地後の床反力をスイッチとして実現することを考える。この AFO の底屈剛性の模式図を Fig.1 に表す。

このような剛性切替を実現するための AFO 関節構造として、シューホーン型 AFO の足関節部背面に内部境界を有する関節構造を設け、内部境界の開口・閉口により AFO 関節としての低剛性・高剛性を対応づける。この内部境界

の開口・閉口を踵部に作用する床反力の有・無により切替える柔軟機構を組み合わせる(Fig. 2)。

この柔軟機構は、遊脚期から立脚期に移行する踵接地時に作用し始める床反力をスイッチ荷重として、ピンセットのように作動し、その先端に設けたスイッチ要素を関節構造の内部境界から離脱させることで、関節構造剛性の高剛性から低剛性へ切り替えることが可能となる(Fig.3)。

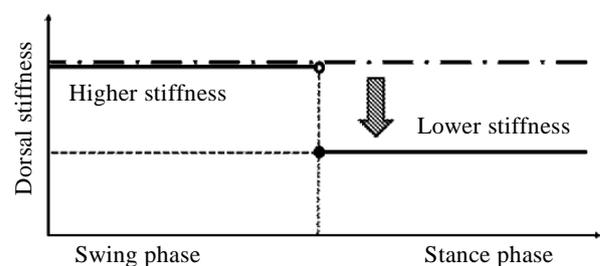


Figure 1 AFO stiffness

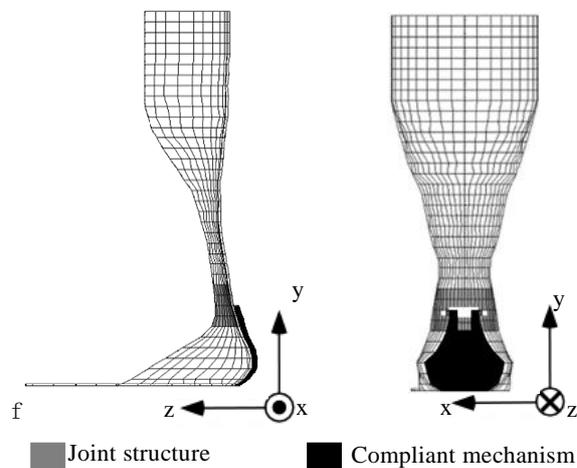
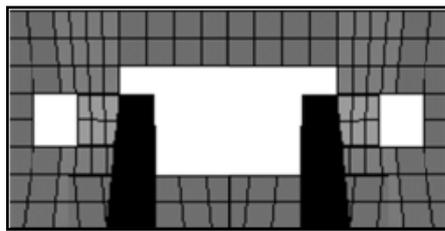
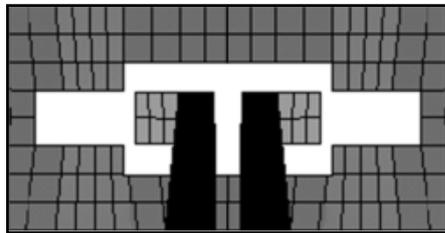


Figure 2 Schema of shoehorn AFO with switching stiffness



(a) For higher stiffness



(b) For lower stiffness

Figure 3 Switching mechanism

3. 関節構造および柔軟機構の形状設計法

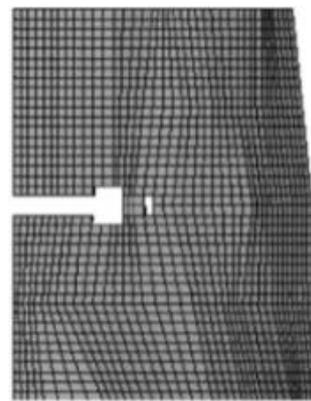
前項で述べた関節構造と柔軟機構について、シューホーン AFO と同一あるいは同様の弾性素材をもちい、最適構造設計のアプローチでその形状を考える。形状設計問題で勘案する基本的な設計条件は、

- a) 遊脚期において実現する AFO の底屈剛性 K_h
- b) 立脚初期において実現する AFO の底屈剛性 K_l
- c) 底屈剛性を切り替える踵床反力の大きさ F
- d) 底屈剛性を切り替える踵床反力と下腿軸との角度 α
- e) 弾性素材の許容応力 σ_{max}
- f) 柔軟機構の必要出力変位 u_{outmin}
- g) 柔軟機構と AFO との干渉制約

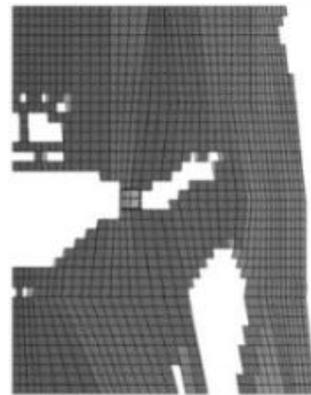
である。

関節構造および柔軟機構の形状決定は、トポロジカルな連結性を定める位相設計と具体的なジオメトリーを定める幾何形状設計との二段階で行う。関節構造設計においては、条件 a) から e) を制約条件として、設計対象部分の体積を目的関数とする最小化問題として定式化する。柔軟構造設計においては、条件 a) と b), e) から g) と柔軟機構体積の上限を制約条件として、床反力についての条件 c) と d) による踵部の変位を目的関数とする最小化問題として定式化する。いずれの問題においても、位相設計問題は、設計可能領域について立方体有限要素ごとに定義した仮想的な密度を設計変数とし、チェッカーボード回避を考慮した SIMP 法により取り扱う。幾何形状設計においては、SIMP 法による解を閾値処理した上で形状の平滑化を施した設計位相に四面体有限要素分割を行い、表面形状を構成する節点座標を設計変数とし、Traction 法により取り扱う。

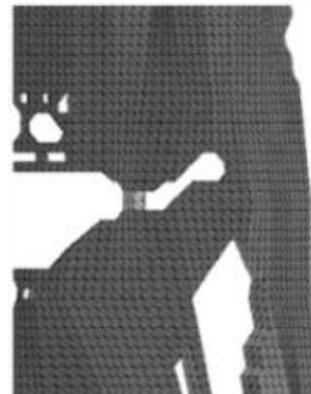
この方法の妥当性を確認するため、AFO の足関節背面部を、矢状面についてほぼ左右対称とみなした 1/2 設計領域についての関節構造の形状決定例を示す。構造内部の連結性を決定する位相設計を行った後に具体的な形状を決定する形状設計を行った。Fig. 4 (a) は、対象とした初期設計領域を示したものであり、位相設計により (b) に示す連結構造が得られた。この表面を平滑化したうえで要素分割を行った形状が (c) である。これを初期形状として幾何形状設計を行ったものが (d) であり、所定の高剛性と低剛性を実現する関節構造形状が得られた。



(a) Initial design domain



(b) Topology determined



(c) Initial geometry



(d) Geometry determined

Figure 4 Sample shape of joint structure (right half)

参考文献

- (1) Naito et al., *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, vol. 4, no. 2, pp.182-191, 2009.
- (2) 田中ら, 日本機械学会論文集C編, vol. 63, no. 607, pp. 176-179, 1997.