レバー駆動式車いすの動力学シミュレーション

○太田 悠希 (岩手大院), 佐々木 誠 (岩手大), 長谷 和徳 (首都大), 山口 昌樹 (岩手大)

Dynamics simulation of lever-propelled wheelchair

Yuki OTA (Iwate Univ.), Makoto SASAKI (Iwate Univ.)

Kazunori HASE (Tokyo Metropolitan Univ.), Masaki YAMAGUCHI (Iwate Univ.)

1. 諸言

車いす駆動に伴う最も深刻な問題は、使用者の半数以上が経験する関節痛、回旋筋腱板損傷、尺骨神経損傷、手根菅症候群などの2次的障害の発症である。近年では、これらの問題を解決する一つの手段として、レバー式車いすの利用が注目されている。レバー式車いすは、ハンドリム式よりも駆動力の伝達損失が少ないうえ、ハンドリム半径よりもレバー長が長いことから、小さな駆動力での移動を実現できる。また、一般的な駆動輪軸位置やシート位置・角度などに加えて、レバー長、グリップの位置・角度、ギア比など使用者の身体的特徴に適合できる設計パラメータも多い。このように、レバー式車いすは様々な優位性を備えているが、ハンドリム式と比較して使用例が少ないうえ、これら複数のパラメータを合理的に最適化する指標が確立されていないため、レバー式の恩恵を最大限に受けられるような個人への適合は十分に行われていない。

そこで本研究では、人体の運動特性と車いすの物理的特性をモデル化し、コンピュータ上で車いす設計ならびに個人への適合を合理的に行うシミュレータ開発を目的とする。ここでは、その基礎検討として、コンピュータ上にレバー式車いすの駆動動作を生成するための動力学シミュレーション手法を提案する。

2. 車いす駆動シミュレーションの提案

2. 1. シミュレーションモデル

本研究で提案する車いす駆動シミュレーションモデルは、筋骨格モデルと神経モデルで構成される(図1)。筋骨格モデルは、動力学解析ソフトウェアSIMM (Software for Interactive Musculoskeletal Modeling, Nac Image Technology Inc.) を用いて構築し、3次元CADソフトウェア (SolidWorks Co.) で作成したレバー式車いすに着座させた。筋骨格モデルと車いすが接触する各部 (グリップ部、背もたれ、座面、フットレスト) には、反力を生成するためのスプリングフロアを設定した。また、

路面と接触する車輪には、72箇所のスプリングポイントを設定し、床反力を作用させた。レバー操作時にグリップから手に伝わる反力(駆動力)は、この床反力をもとに計算した。

神経モデルは、リズム生成システムと体性感覚システムで構成される。リズム生成システムは、各関節の自由度に応じた数の神経振動子からなり、それぞれが関節を駆動する基本リズムパターンを生成する。図中の○印が1つのニューロン、=印が2つのニューロンの抑制的結合を表しており、結合したものが1つの神経振動子を形成している。神経振動子の各ニューロンの状態は次式で表される。

$$n_i = \max(0, u_{i1}) - \max(0, u_{i2}) \quad (1)$$

$$\tau_{i1} \dot{u}_{i1} = -u_{i1} - \delta \max(0, u_{i2}) + feed_i \quad (2)$$

$$\tau_{i2} \dot{u}_{i2} = -u_{i2} - \delta \max(0, u_{i1}) - feed_i \quad (3)$$

ここで、 i は神経振動子の番号、 n_i は神経振動子の出力、 u_{i1} 、 u_{i2} はニューロンの内部状態、 τ_{i1} 、 τ_{i2} は時定数、 δ は相互抑制の重み係数、 $feed_i$ は体性感覚フィードバック信号を表す。

体性感覚システムは、次点の神経振動子のリズムパターンを生成するために、モデルの運動状態に応じたフィードバック信号を作り出す。このフィードバック信号は、PD制御と重力成分を考慮し

図1 車いす駆動モデルの概略

た長谷ら¹²⁾のモデルを参考に、次式で与えた。

$$feed_i = k_i \theta_i + c_i \dot{\theta}_i + p_i + INV_i(0,0,\theta) \quad (4)$$

ここで、 $feed_i$ は体性感覚フィードバック信号、 k_i は位置フィードバックゲイン、 c_i は速度フィードバックゲイン、 p_i は定常信号、 θ_i 、 $\dot{\theta}_i$ はそれぞれ関節角度、関節角速度を表す。 $INV_i(0,0,\theta)$ は、姿勢維持に必要な関節トルクを表す。

2. 2. 駆動動作の生成

リズム生成システムで生成した出力信号は、筋骨格モデルの駆動力となり、各関節の角度、角速度などの身体運動が生成される。さらに、この身体運動の状態が、次点における神経振動子のリズムパターンの計算に反映される。この一連の計算を時々刻々繰り返すことで、神経系と筋骨格系が相互協調した車いす駆動パターンが生成される。しかし、筋骨格システムへの入力値が適切でなければ、人間には不可能な姿勢や不自然な動きが生成されるため、神経系のパラメータ τ_{i1} 、 τ_{i2} 、 δ 、 k_i 、 c_i 、 p_i を適切に設定する必要がある。ここでは、単位移動距離あたりの関節トルクの2乗和を人の運動決定基準と仮定し、以下の目的関数を最小にするようなパラメータを、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を用いて探索した。

$$I = T_f/D \rightarrow \min \quad (5)$$

ここで、 T_f は関節トルクの2乗和、 D は車いすの移動距離を表す。

2. 3. シミュレーション条件

動作生成の基礎検討として、まずは簡略化した計算条件のもとで順動力学シミュレーションを行った。人体モデルの関節自由度は、上肢のみに与え、それ以外はすべて拘束した。神経振動子の出力信号は、関節トルクに置き換えて筋骨格モデルを駆動した。シミュレーションにおけるGAの個体数は30、シミュレーション時間は1.0 s、ステップ幅は0.05 sとした。なお、パラメータの探索初期においては、まず既定の距離を移動できることを目指し、移動距離 D が最大になるように目的関数を設定した。その後、規定の距離を超えたところで目的関数を式 (5) に切り替えた。

3. シミュレーション結果

本提案手法により生成したレバー式車いすの駆動動作の結果を図2に示した。GAによる神経系パラメータの探索初期では、レバーを40°以上も体の後方に倒すという不自然な動作になったのに対し

て、探索を継続することで、レバーを押す、引くという一連の基本動作が生成されることが確認された。駆動動作の滑らかさや周期性については、今後更なる検討が必要であるが、神経系と筋骨格系を有する動力学シミュレーションにより、レバー操作の目標値を与えることなく、駆動動作を獲得できたことは、新しい車いす設計の実現に大きく貢献するものと考えられる。

図2 駆動動作の生成結果

4. 結論

本研究では、レバー式車いすの駆動動作をコンピュータ上に生成するために、神経系と筋骨格系を有するシミュレーションモデルの提案を行った。動力学シミュレーションによる駆動動作の生成を行ったところ、レバー操作の目標値を与えることなく、基本的な駆動動作を生成できる可能性が示された。今後は、本シミュレータの基本性能を向上させるとともに、仮定した運動決定基準の妥当性や生成された駆動動作について十分な検討を行い、個々人に最適な車いす設計の実現を目指す予定である。

参考文献

- 1) K. Hase, N. Yamazaki, "Computer Simulation Study of Human Locomotion with a Three-dimensional entire-body neuro-musculo-skeletal model: I. Acquisition of normal walking," JSME International Journal, Series C, vol.45, no.4, pp.1040-1050, 2002.
- 2) C.S. Kim, G.M. Eom, G.R. Tack, K. Hase, G. Khang, G.R. Tack, J.H. Yi, J.H. Jun: Stimulation pattern-free control of FES cycling: Simulation study, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, vol.38, no.1, pp.125-134, 2008.