膝関節及び股関節を考慮した車いす前輪上げ時における 動作負担感のシミュレーション解析

○中村 孝文、田内 雅規（岡山県立大学保健福祉学部）

三上 ゆみ（新見公立短期大学地域福祉学科）

Simulation Analysis of Subjective Physical Load to Lift-up Wheelchair Front

Considering with Angles of Femoropatellar Joint and Hip Joint

Takabun NAKAMURA, Masaki TAUCHI (Dept. of Welfare System and Health Science,
Okayama Prefectural University), Yumi MIKAMI (Dept. Community Welfare, Niimi College)

1. はじめに

介護用車いすは障害や高齢等のため単独移動が困難な人を支援する用具として有用である。段差や路面の凹凸が激しい場所ではティッピングレバー（以下TPL）を用いて前輪を上げ下げする。しかし、現状のTPLの位置や形状は介助者が女性や高齢で非力な場合には動作に困難を伴うことがあると考えられ、その改良が望まれている。我々はTPL位置に着目し、TPL位置と介助者の負担感との関係から最適位置を提案した¹⁾。しかしこれは様々な体格の被験者の平均的な主観結果を基にしたものであるため、今後体格の異なる個人に対して適切なTPL位置を知るための理論的な根拠を示す必要がある。そのため負担感の原因となる身体動作のシミュレーションを試みたが²⁾、床からの高さに対する飽和特性の解釈に問題が残った。そこで脚の力の出しやすさに関節角度が非線形性的に影響していると仮定し、高さの影響を受けやすい股関節角度に関するパラメータを導入して実験特性を解釈できるかを検討した。

2. 方法

図1-Aを基にTPL位置 (x, y) 、車軸高さ H 、TPL高さ h 、踏力の大きさ F と方向 θ 、発生トルク M の関係を求めた。

$$F = M / (x \cdot \cos\theta + (H-h) \cdot \sin\theta) \quad (1)$$

次に x_1 の位置に立ち（図1-B）、TPLに足を掛けた時の膝関節角度 α を求める。TPL位置を後輪車軸から x 、床から h とし、大腿長 L_1 、下腿長 L_2 、股関節からTPLまでの直線距離 L_3 、軸足の傾き θ_3 （反時計回り）とすると、

$$\alpha = \cos^{-1} (L_1^2 + L_2^2 - L_3^2) / (2 L_1 L_2) \quad (2)$$

ここで

$$L_3^2 = L_4^2 + (L_1 + L_2) \cdot \cos\theta_3 - h^2$$

$$L_4 = x_1 - (L_1 + L_2) \cdot \sin\theta_3 - x$$

図1 シミュレーション模式図

(A) ティッピングレバー位置と前輪上げモーメント発生
の関係、(B) TPL位置とTPLに掛けた下肢との関係

また図1-Aの θ に相当する θ_2 は次式となる。

$$\theta_2 = \sin^{-1} (L_4 / L_3) \quad (3)$$

大腿四頭筋の収縮により発生する踏力 P は、膝関節を伸展させる力 W と膝関節角度 α により次式で近似される³⁾。

$$P = W \cdot 1/2 \cdot \tan(\alpha/2) \quad (4)$$

(1)式 F を(4)式 P で置き換え、 W は(5)式で表せる。

$$W = 2M / \tan(\alpha/2) / (x \cos\theta + (H-h) \sin\theta) \quad (5)$$

ここで踏み込み角度 θ は(3)式である。

力 W の心理量 J は感覚べき乗則により次式で表わされる。

$$J = k \cdot W^{1.5} \quad k: \text{常数} \quad (6)$$

前輪を100mm挙上するには車いすを後輪車軸回りに16度回転する必要があるが、回転に伴いTPL位置 (x, y) も移動するため、(6)式の J の値も変化する。そこで負担感16度回転する間の J の総量と仮定し、(7)式にて求めた。

$$J_{sum} = \sum J_i, \quad i=0 \sim 16 \quad (7)$$

踏力は股関節角度にも関係する³⁾。そこで J_{sum} に股関節角度（図1-Bの $\theta_1 + \theta_2$ ）の影響を表す係数を掛けて負担感とすることとした。股関節角度の踏力に及ぼす影響量の関係式はこれまで報告されていないので、今回は(8)式のような2次多項式で表せるものと仮定した。

$$C = a \cdot (\theta_1 + \theta_2 - b)^2 + c \quad (8)$$

ここで C は股関節角度の影響を表す係数、 a, b, c は適当な定数である。最終的に得られる負担感 J_{load} は

$$J_{load} = C \cdot J_{sum} \quad (9)$$

とした。

3. 結果

シミュレーションとの比較のために実測結果¹⁾を図2に示した。後輪軸からの水平距離に対する特性(図2-A)は、どの高さにおいても距離が長くなるにつれてほぼ直線状に負担感が減少する。一方、床からの高さに対する特性(図2-B)は高さと共に増加するものの、15.5cm以上では飽和する非線形特性であった。

シミュレーションでは身長160cmの女性を想定し、 $L_1=320\text{mm}$ 、 $L_2=354\text{mm}$ 、 $x_1=530\text{mm}$ 、 $x=150, 175, 200, 225\text{mm}$ 、 $h=125, 137.5, 175\text{mm}$ 、 $\theta_3=15^\circ$ とし、(8)式における各定数を $a=-0.001156$ 、 $b=45.15$ 、 $c=0.9646$ として J_{load} を求めた(図3)。後輪軸からの水平距離に対する特性(図3-A)は高さ175mmでは実測データ実際とは若干異なるものの、どの高さにおいても負担感は後輪軸からの水平距離に対して直線的に減少して実測の特性を表している。また、床からの高さに対しては(図3-B)125mm~150mmでは増加、150mm以上では飽和し、実測での特性と類似した。

4. 考察

先の報告²⁾では踏力源として大腿四頭筋による膝関節伸展の要素を主にTPL踏み込み時に必要な力を計算したが、高さが増すと負担も直線的に増す特性を示し、実測データ特性を解釈できなかった。Hugh-Jones³⁾は平座位投足姿勢で膝関節角度が同じ場合は股関節角度が大きいと踏力が大きくなることを報告している。そこで、股関節角度が力の出し易さに影響をするという仮定を立て、そのパラメータ係数を2次関数で近似してこれまでのシミュレーションモデルに導入したところ、実測データの特性を近似できた。TPLの高さが増すと股関節角度も増し、力の出しやすさの増加、即ち負担感抑制に働くと解釈できる。前輪上げに必要な踏力は高さと共に増加するが、力の出しやすさも増加するので、それらが相殺して実測では飽和特性を示すと考えられた。

以上より、TPL高さの脚への負担感の非線形性は股関節角度に関する非線形パラメータを導入することで解釈できると考えられた。

参考文献

図2 前輪上げ動作における脚への負担感¹⁾

(A) 後輪軸からの水平距離に対する特性、(B) 床からの高さに対する特性。

図3 股関節の影響を含めたシミュレーション結果

(A) 後輪軸からの水平距離に対する特性、(B) 床からの高さに対する特性。図中の数字は水平距離を表す。

- 1) 中村孝文, 黒岡紀哉, 田内雅規: 人間工学, 49(2), 43-53, 2013.
- 2) 中村孝文, 田内雅規: 日本人間工学会第54回大会講演集, 222-223, 2013.
- 3) P. Hugh-Jones: J. Physiol., 105, 332-344, 1947.