

階段昇降時の脚の負担に及ぼす手すり形状の影響

Effect of Handrail Shape on the Load of Leg in Stepping Stairs

正 栗田 裕 (滋賀県立大) 正 松村 雄一 (滋賀県立大) ○学 棚部 旭紘 (滋賀県立大院)

Yutaka KURITA, The University of Shiga Prefecture, 2500 Hassaka-cho, Hikone, Shiga, 522-8533

Yuichi MATSUMURA, The University of Shiga Prefecture

Akihiro TANABE, The University of Shiga Prefecture

The effect of a handrail was clarified by evaluating the load of leg in stepping stairs by the sum of the moments of knee and ankle. When body is supported by a handrail, the center of gravity goes backward, and the angle of shank decreases. From the result of experiment, it was proven that there was an optimum value respectively for the height and the position of a handrail. And, we made the mechanism model which can express the movement of each part of the body in stepping stairs, based on geometric relation.

Key Words: Human Engineering, Biomechanics, Bio-Motion, Handrail for Stairs, Physical Exercise

A1. 緒 言

階段を昇り降りするときには、体重のかかった状態で膝を曲げたり伸ばしたりするため、脚の負担は大きいものになる。本研究では、階段昇降時に水平部分を設けた手すりを使用することで、従来の手すりに比べ脚の負担がどのように変わるのかを検討する。

A2. 実 験

階段昇降時に脚に加わる負担を、膝と足首にかかるモーメントの和で近似的に算出した。Fig.A1 に、階段昇り時の脚の負担の評価方法を示す。膝にかかるモーメントは $M_1 = F(L \sin \theta - l)$ 、足首にかかるモーメントは $M_2 = Fl$ と表せるので、脚の負担 M は $M = FL \sin \theta$ で表される。

Fig.A2 に、階段を昇るときに脛の角度、床の反力、脚の負担の時間変化を示す。従来の手すりとして、 35° の角度がついた手すりを使用した。Fig.A2(a)と Fig.A2(b)を比較すると、水平な手すりでは従来の手すりに比べ、脚の負担の最大値は3分の1近くまで減少することがわかる。このとき、脛の角度は6割近く減少しているが、床の反力は、1割程度しか減少していない。よって、脚の負担が減少する要因は、脛の角度が減少することである。また、Fig.A2(b)と Fig.A2(c)を比較すると、従来の手すりの脚の負担の最大値は、手すりが無いときとほぼ同じである。

Fig.A3 に、脛の角度が最大となる時刻における画像を示す。Fig.A3(a)から、手すりを使わないときは、重心の位置(図中○印)が踵の位置より前になる。ある瞬間に片足立ちとなるが、手すりを使わずに安定して片足立ちするためには、重心が足の裏の上にくる必要がある。手すりを使うと、重心は手をついた位置と足の裏の上との間にあればよ

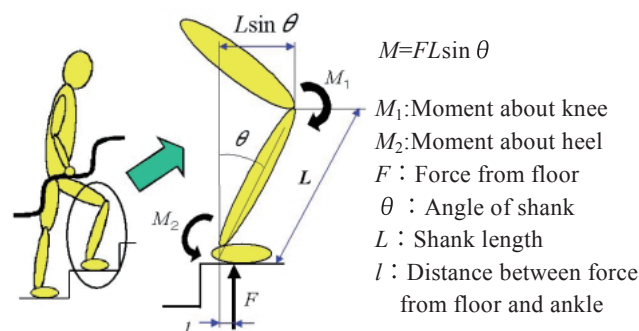
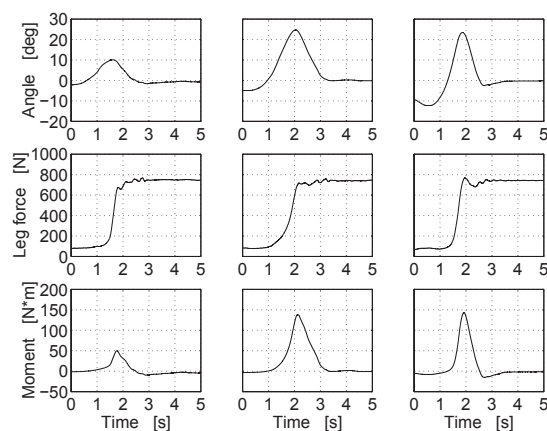


Fig.A1 Measurement of the load which is charged on the leg

いので、Fig.A3(b)に示すように、重心が足の裏より後方でも階段を昇ることができる。このように、水平な手すりを使うことで、脛の角度は緩やかになり、結果として脚の負担は小さくなる。

A3. 結 論

- (1) 階段を昇るときに水平な手すりを使用することで、脚の負担が軽減される。
- (2) 脚の負担が減少する要因は、水平手すりを使うことで、体の重心位置を後に残すことが可能となり、脛の角度の最大値が減少することである。



(a)With handrail-0deg (b)With handrail-35deg (c)Without handrail

Fig.A2 Effect of handrail in going up stairs

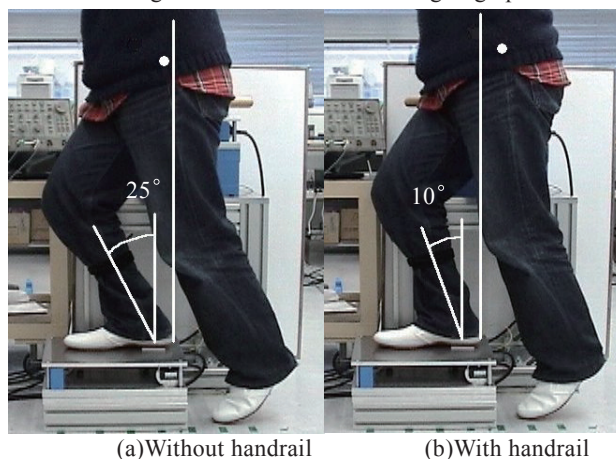


Fig.A3 The center of gravity position in going up stairs

1. 緒言

階段を昇り降りするときには、体重のかかった状態で膝を曲げたり伸ばしたりするために、脚の負担は大きいものになる。体力の充分でない高齢者や身障者、病人にとって、階段を昇降することは容易ではない。そのため、階段を昇降するときには、手すりで体重の一部を支えるようにして、脚の負担を軽減している。しかし、従来の傾斜のついた直棒の手すりでは、体重を支えるために手すりを握らなくてはならず、握力がないと手が滑り危険である。そのため、手すりに水平部分を設けて、体重を支えやすくする方法⁽¹⁾⁽²⁾が提案されている。

本研究では、階段昇降時に水平部分を設けた手すりを使用することで、従来の手すりに比べ脚の負担がどのように変わるのかを調べる。まず、水平な手すり、従来の手すり、と手すりが無いときの脚の負担を比較し、水平な手すりの効果について検討する。また、階段を昇る動作をビデオで撮影し、撮影した映像から、脚の角度や体の重心の移動を観察する。さらに、体の各部をリンクとして近似した機構モデルを作成し、階段昇降時の体各部の運動を合理的に表すことを検討する。

2. 実験方法

2・1 脚の負担の評価方法

膝をまっすぐに伸ばし直立しているときは、体重の大部分を脚部の骨格が支え、脚の筋肉にはあまり負担がかからない。しかし、階段を昇降するときには、膝が曲がるために、上体部の重量が膝関節まわりのモーメントとして作用する。また、床の反力の作用線から足首関節までの距離により足首関節まわりにもモーメントが作用する。これらのモーメントを受け止め、姿勢を保持するために、膝関節付近と足首関節付近の筋肉に負担がかかる。よって、階段昇降時に脚に加わる負担は、厳密には筋肉に働く力から算出されるモーメントとして定義されるが、筋肉に働く力の計

測は困難である。そこで、床の反力の大きさと脛の角度から、膝と足首にかかるモーメントの大きさの和を近似的に算出した⁽³⁾⁽⁴⁾。

Fig.1(a)に、階段昇り時の脚の負担の評価方法を示す。まず、床反力の合力 F は足の裏部分に作用する。足首関節から膝関節までの距離は、脛の長さ L と脛の倒れ込む角度 θ から算出した。床の反力の作用線から足首までの距離を l とすると、膝にかかるモーメントは $M_1 = F(L \sin \theta - l)$ 、足首にかかるモーメントは $M_2 = Fl$ と表せるので、脚の負担 M をこれらの和であると仮定すると、 $M = FL \sin \theta$ で表すことができる。

Fig.1(b)に、階段降り時の脚の負担の評価方法を示す。昇り時と同様に、床の反力 F と脛の角度 θ から、脚の負担を算出した。ただし、階段降り時には踵が浮き上がるため、床の反力の作用線から足首関節までの距離は、つま先から足首関節までの距離 L_2 と踵が浮き上がる角度 θ_2 から算出した。よって、足首にかかるモーメントは $M_2 = FL_2 \cos \theta_2$ 、膝にかかるモーメントは $M_1 = F(L \sin \theta_1 - L_2 \cos \theta_2)$ となり、 $\theta_1 = \theta + \theta_2$ とすると、脚の負担は $M = FL \sin \theta_1$ で表される。

2・2 実験装置

Fig.2(a)に、手すりにかかる力を測定する装置を示す。天板と底板の間に、ロードセルを三角形に配置し、3つのロードセルの出力和を求めた。装置の四隅には、天板と底板を平行に保つためのガイドを設けた。天板の上に直径 32mm の木製の手すりを取り付けた。

Fig.2(b)に、床の反力を測定する装置と、脚部の角度を測定する装置を示す。床の反力の測定は、手すりに加わる力を測定する装置と同様の構造とした。脛の角度は、靴の踵部分に取り付けたポテンシオメータで測定した⁽⁵⁾。ポテンシオメータに、脛と同じように動く治具を取り付け、脛の角度を測定した。また、踵が浮き上がる角度は、靴のつま先部分に取り付けたポテンシオメータで測定した。ポテンシオメータに取り付けた治具の先端を、靴の踵部分に固定し、踵が浮き上がる角度を測定した。

実験は 1 名の被験者で行い、被験者の体重は 760N、脛の長さは $L=0.48\text{m}$ 、手のひらから床までは約 800 mm である。

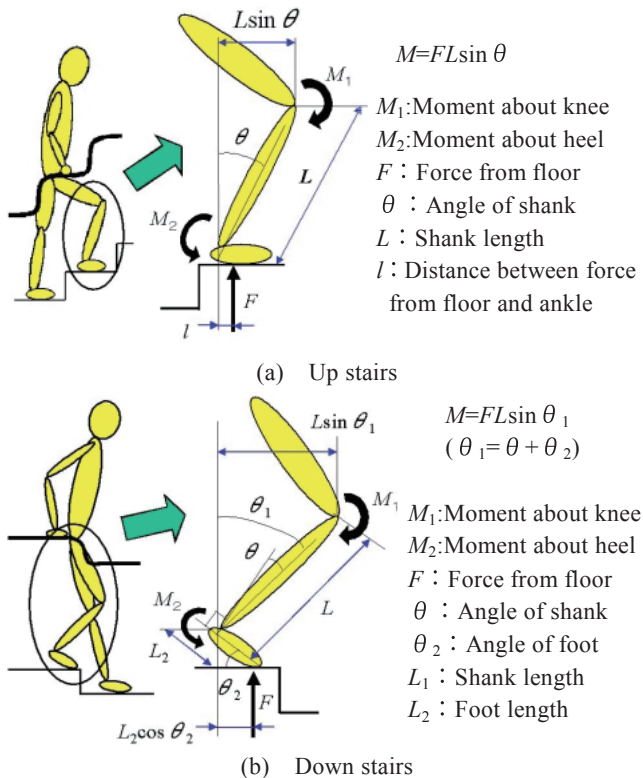
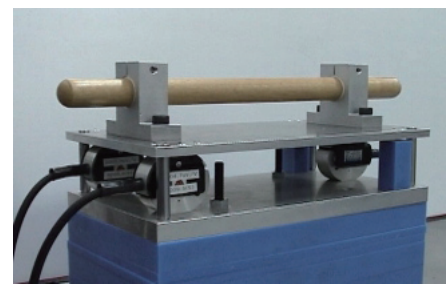
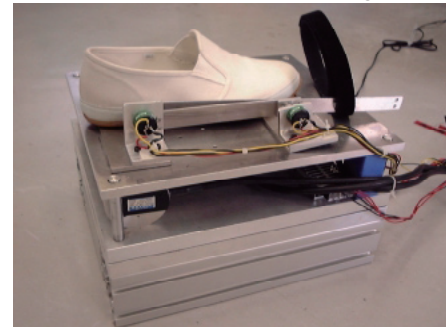


Fig.1 Measurement of the load which is charged on the leg



(a) Measurement of force which leans against handrail



(b) Measurement of reaction force from floor and the angle of leg

Fig.2 Measurement device

3. 階段昇り実験

3・1 水平手すりの効果

階段を昇るときに、水平な手すりを使用するときと従来の手すりを使用するときで、脚の負担がどう変わるのかを調べた。Fig.3 に、脛の角度、床の反力、脚の負担の時間変化を示す。手すりの高さは 900mm、段差は 200mm とした。手をつく位置は体の真横である。従来の手すりとして、35°の角度がついた手すりを使用した。

Fig.3(a)と Fig.3(b)から、水平手すりを使用することで従来の手すりに比べ、脚の負担の最大値は 3 分の 1 近くまで減少することがわかる。脛の角度の最大値は、脚の負担がピークとなる時刻とほぼ一致し、25° から 10° に減少した。また、床に加わる力は、軽く脚を載せただけの状態から、全体重がかかっている状態へ速やかに収束している。水平な手すりでは従来の手すりとは比べ、脚の負担が最大時の床の反力は 1 割近く減少した。よって、脚の負担が減少する要因は、脛の角度の最大値が減少することである。

Fig.3(b)と Fig.3(c)を比較すると、従来の手すりの脚の負担は、手すりが無いときとほぼ同じであることがわかる。従来の手すりを使用したときと手すりが無いときでは、脛の角度の最大値はほぼ同じであった。また、脚の負担が最大時の床の反力は、従来の手すりでは手すりが無いとき比べ、僅かに減少した。よって、従来の手すりでは脚の負担を軽減することは難しい。

次に、階段を昇るときの様子をビデオカメラで撮影し、重心の状態や脛の角度を観察した。Fig.4 に、脛の角度が最大となる時刻における画像を示す。重心の位置は腰骨の少し上⁽⁶⁾とし、○印で示す。Fig.4 (a)からわかるように、手すりを使わないときは、重心の位置が踵の位置より前にくる。階段を昇るとき、ある瞬間に片足立ちとなるが、手すりを使わずに安定して片足立ちするためには、重心が足の裏の上にくる必要がある。手すりを使うと、重心は手をついた位置と足の裏の上との間にあればよいので、Fig.4 (b)に示したように、重心が足の裏より後方でも階段を昇ることができる。このように、水平な手すりを使うことで、脛の角度は緩やかになり、結果として脚の負担は小さくなる。

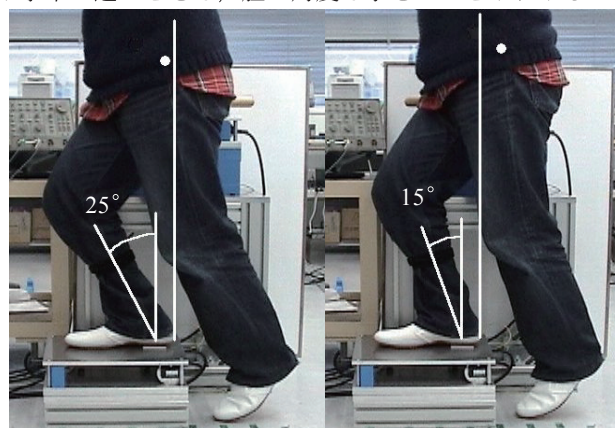
さらに、水平な手すりを使用したときに、床の反力が減少する要因について検討する。Fig.5 に床の反力と手すりに加わる力を示す。Fig.5 から、手すりが無いとき床の反力は、一度ピーク値となったあと少し減少し、その後全体重分 760N に収束していることがわかる。また、水平手すりを使用したときは、床の反力（一点鎖線）のピーク値が 1 割程

度減少している。このとき、手すりには、体重の 1 割程度の力に加わっている（破線）。手すりに加わる力のピークは、床反力のピークより少し前である。この手すりに加わる力と床の反力を加算すると、手すりが無いときの床の反力とほぼ一致している（実線）。したがって、水平な手すりを使用すると、手すりに全体重の 1 割程度の力に加わり、床の反力のピーク値が抑えられると言える。

従来の手すりのように、角度がついた手すりでは、手すりを握らないと手が滑り、体重を支えにくい。また、手首の角度も不自然となり、力が入りにくくなる。そこで、脚の負担を軽減することができる手すりの角度について検討する。Fig.6 に、手すりの角度と脚の負担の関係を示す。手すりの角度を -15° から 45° の間で 5° 刻みで変化させた。筋力が低下している人が使用することを考慮し、手すりは握らない。手すりの高さは 900mm、手をつく位置は体の真横、階段の段差は 200mm とした。図中の破線は、手すりを使わないときの脚の負担である。

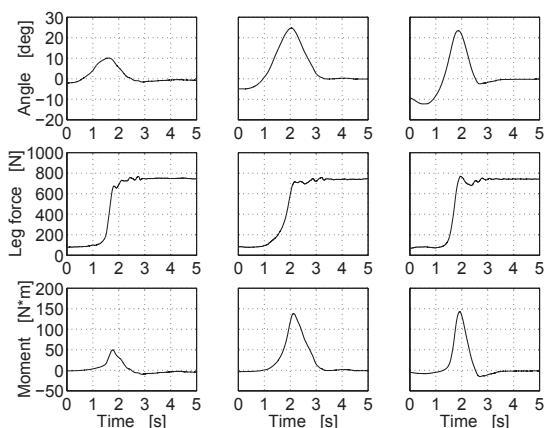
Fig.6 から、手すりの角度が水平に近いほど、脚の負担は小さくなることがわかる。手すりの角度が ±5° 以内であれば、手すりの効果があるといえる。しかし、手すりの角度が増加し 35° 以上になると、脚の負担は手すりが無いときの値と変わらなくなる。よって、一般に用いられているような 30° 以上の角度がついた手すりでは、脚の負担を軽減することは難しいと考えられる。

次に、手すりの角度が水平に近いほど、脚の負担が減少する要因を検討する。Fig.7 に、手すりの角度と脛の角度、手すりに加わる力の関係を示す。Fig.7 から、手すりの角度が水平に近いときは、脛の角度は小さいことがわかる。し



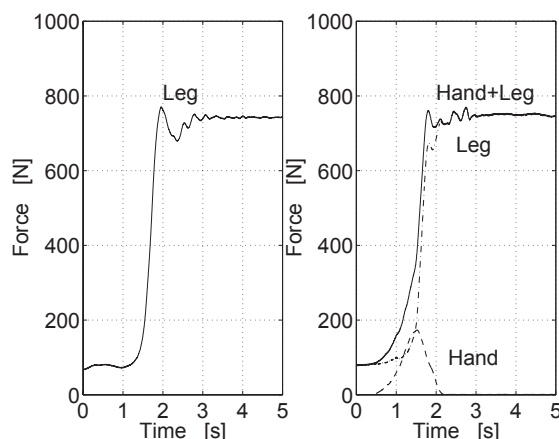
(a) Without handrail (b) With handrail

Fig.4 The center of gravity position in going up stairs



(a)With handrail - 0deg (b)With handrail - 35deg (c)Without handrail

Fig.3 Effect of handrail in going up stairs



(a)Without handrail (b)With handrail

Fig.5 Reason why the ground reaction force decreases

かし、手すりの角度が増加すると脛の角度は増加する。また、手すりに加わる力は、手すりの角度が $\pm 5^\circ$ の間では、手すりに充分体重がかかっている。しかし、手すりの角度が増加すると手すりにかかる体重は小さくなり、手すりですべて体を支えることができない。よって、手すりの角度が水平に近いほど、手すりですべて体を支え、体の重心を後方に残すことが容易になり、脛の角度が減少することで脚の負担が軽減できた。

3・2 手すりの位置と脚の負担の関係

水平手すりの高さや手をつく位置が、階段を昇るときの脚の負担に及ぼす影響について調べる。Fig.8に、手をつく位置を体の真横にしたとき（図中●印）と、そこから前方に150mmの点にしたとき（図中○印）の手すりの高さと脚の負担の関係を示す。手すりの傾きは無く水平で、階段の段差は200mmとした。

Fig.8から、体の真横に手をついたときは、手すりの高さによって脚の負担が大きく変化していることがわかる。手すりの高さが900mmのときに脚の負担が最も小さく、手すりがない場合の約3分の1であった。手すりの高さが900mmより高くても低くても脚の負担が大きくなる。この被験者の場合、手のひらから床までの距離が約800mmであり、手すりの高さ900mmは肘が少し曲がる程度の高さであった。被験者の身長によっては、手すりの最適な高さは異なると考えられる。

また、Fig.8から、前方150mmの位置に手をついた場合、脚の負担は、手すりの高さにあまり依存しなくなることがわかる。脚の負担が急激に減少する最適な手すりの高さが無い代わりに、多少手すりの高さが変化しても、急激に手

すりの効果が落ちることは無い。脚の負担は、手すりの高さに関わらず、手すりがない場合の約3分の2になっている。言わば、万人向けの手すりの位置といえる。

手をつく位置が体の真横のときは、階段を昇ると体が前方に進み、手すりの高さが最適でないと手すりから手が離れる。そのため、体を十分に支えられず、重心位置を後方に残すことができない。また、手をつく位置が前方のときは、その分、重心位置も前方にくるため、手すりが真横のときに比べると脚の角度は大きくなる。しかし、体が前方に進んでも手すりから手が離れにくいいため、手すりの高さが多少変化しても手すりですべて体を支えることができ、重心位置を後方に残すことができた。

3・3 階段の段差と脚の負担の関係

階段の段差が、階段を昇るときの脚の負担に及ぼす影響について調べた。Fig.9に、階段の段差と脚の負担の関係を示す。手すりを使用しないときを○印、手すりを使用したときを●印で示す。手すりの傾きは無く水平で、手すりの高さは900mm、手をつく位置は体の真横より前方150mmの点とした。Fig.9より、段差が150mm以上のときに、手すりの効果があらわれた。段差が200mmのときに最も手すりの効果があらわれ、脚の負担が半分近くに減少した。

Fig.10に、脚の角度が最大となったときの画像を示す。重心位置を●印で示す。手すりは使用しなかった。Fig.10より、階段の段差が大きくなると、脚の角度も大きくなった。これは、脚を上にあげるために、膝を大きく曲げなければならないからである。また、体の重心の位置は、段差の大きさに関係なく足の裏の真上であった。

階段の段差が小さいときは、脚をあまり曲げなくても階

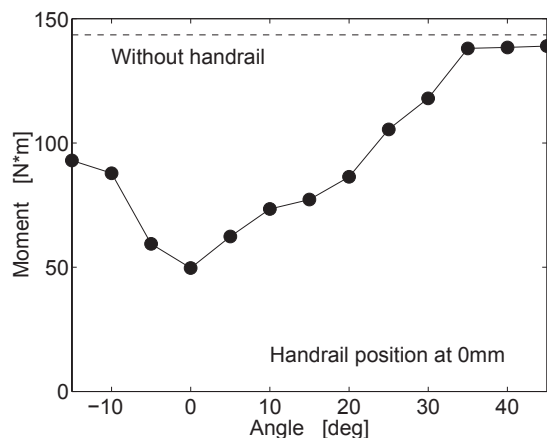


Fig.6 Effect of handrail angle

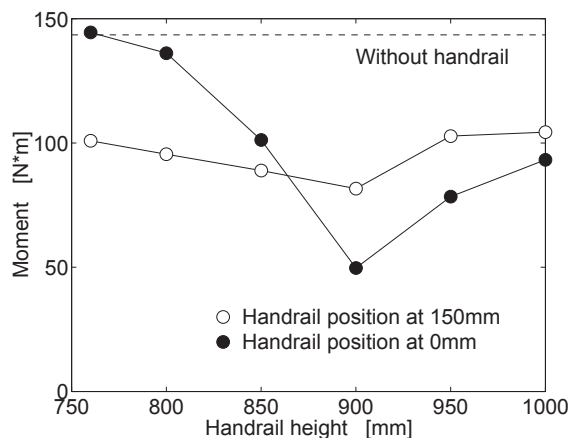


Fig.8 Effect of handrail height

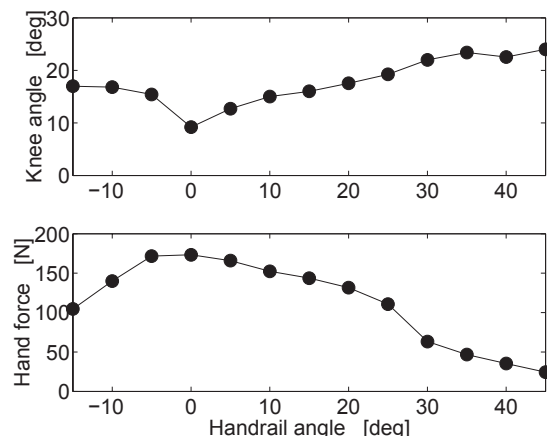


Fig.7 The factor in which the load of the leg decreases

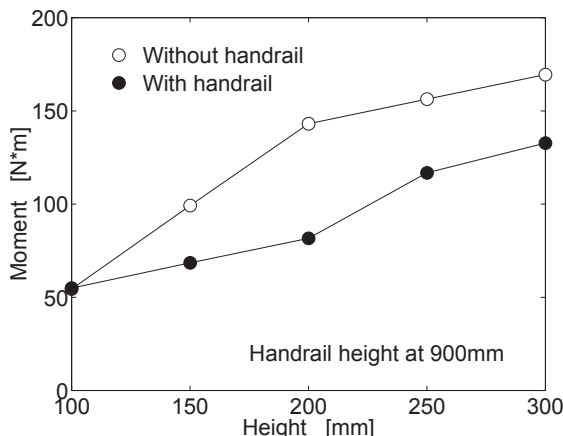


Fig.9 Effect of step height

段を昇ることができるため、手すりがなくても脚の負担が小さく、手すりの効果があらわれにくい。また、階段の段差が大きくなると、脚を大きく曲げなければならず、手すりがあっても脚の負担が大きくなる。

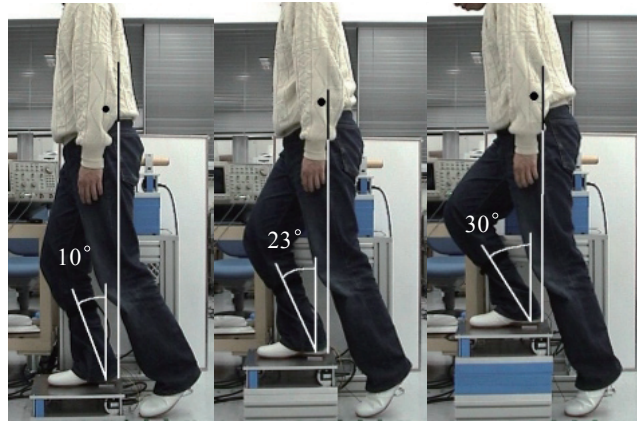
4. 階段降り実験

4・1 水平手すりの効果

階段を降りるときに、水平手すりの有り無しによって、脚の負担がどう変わるのかを調べた。まず、階段を降りるときの、前方へ踏み出す脚と後方の脚の役割について検討する。前方へ踏み出す脚は、膝をほとんど曲げない。後方の脚は膝を曲げ、階段を降りる速度を調節し、前方の脚へ加わる衝撃を弱める。そこで、脚の負担が大きい後方の脚について、水平手すりの有り無しの影響を調べた。

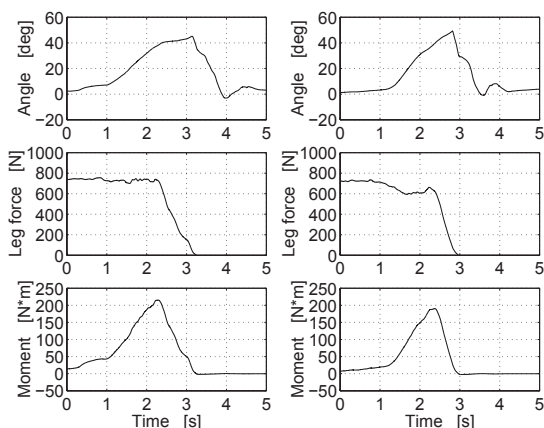
Fig.11 に、階段を降りるときの脚の角度、床の反力、脚の負担の時間変化を示す。階段を降りる動作速度は、前方へ踏み出す脚に衝撃が加わらない程度とした。手すりの高さは 900mm、手をつく位置は体の真横、階段の段差は 200mm とした。Fig.11 から、脚の負担の最大値は、水平手すりを使用することで手すり無しに比べ、1 割程度減少することがわかる。このとき、脚の角度は水平手すりの有り無しでほぼ同じであった。また、床に加わる力は、手すりを使用しないと、全体重がかかった状態から、階段を降りることで速やかに 0N へと収束している。しかし、水平手すりを使用すると、全体重がかかった状態から、一時、手すりで支えた分だけ減少し、0N へと収束している。水平手すりを使用することで、床の反力が、約 1 割減少した。

階段を降りるときには、段差の大きさだけ脚を曲げなく



(a) 100mm (b) 200mm (c) 300mm

Fig.10 Relation between the angle of shank and the level of stair



(a) Without handrail (b) With handrail

Fig.11 Effect of handrail in going down stairs

てはならず、脚の角度に水平手すりの有り無しによる違いはなかった。このため、手すりで体重を支えた分だけ脚の負担が小さくなった。

4・2 手すりの位置と脚の負担の関係

階段を降りるときに、手すりの高さや手をつく位置が脚の負担に及ぼす影響について調べた。Fig.12 に、手をつく位置と脚の負担の関係を示す。手すりの高さは、800mm (図中●印)、850mm (図中■印)、900mm (図中▲印) とし、手すりの傾きは無く水平で、階段の段差は 200mm とした。Fig.12 から、脚の負担は手すりの高さや手をつく位置に依存しないことがわかる。脚の負担は、手すりの高さや手をつく位置に関わらず、手すり無しに比べ約 1 割減少した。

階段を降りるときには、脚の負担が最大時の脚の角度は、段差の大きさで決まるため、手すりの高さや手をつく位置に依存しない。そのため、脚の負担も、手すりの高さや手をつく位置によって変化しなかった。しかし、階段を降りるときは、片足立ちとなる時間が長く、体を支えるものがないと重心が大きくふらつき、体勢が不安定になる。今回は、脚の負担のみで水平手すりの効果について検討したが、重心の安定性についても調べる必要がある。

5. 機構モデルによる実験結果の考察

5・1 機構モデル

3 章で得られた実験結果について、機構モデルにより考察する。ビデオで撮影した映像をもとに、モデルを作成した⁽⁷⁾。階段を昇るときの手すり有り無し、手をつく位置、階段の段差の変化が脚の負担へ及ぼす影響を、1つのモデルで表すことを目指す。

Fig.13 に、階段を昇るときのモデルを示す。体の重心位置を G、腰から膝までの脚の長さを l_1 、膝から踵までの脚の長さを l_2 、腰から重心までの距離を l_3 とし、後方の脚の踵が床から浮き上がる距離を l_4 とする。また、階段の段差を h 、前方の脚と後方の脚の間隔を l_5 とする。前方の脚の、脛の鉛直軸に対する角度を θ 、腿の水平に対する角度を β 、後方の脚の角度を α とする。

鉛直軸方向について、以下の等式が成り立つ。

$$(l_1 + l_2 + l_4) \cos \alpha = l_1 \sin \alpha + l_2 \cos \alpha + h \dots \dots \dots (1)$$

水平方向について、以下の等式が成り立つ。

$$(l_1 + l_2 + l_4) \sin \alpha + l_1 \cos \beta = l_2 \sin \theta + l_5 \dots \dots \dots (2)$$

(1)式と(2)式から $l_1 + l_2 + l_4 = L$ として θ について解くと、

$$2[L(h \cos \alpha + l_5 \sin \alpha) - l_2(h \cos \theta + l_5 \sin \theta) + l_2 L \cos \alpha] = L^2 - l_1^2 + l_2^2 + l_5^2 + h^2 \dots \dots \dots (3)$$

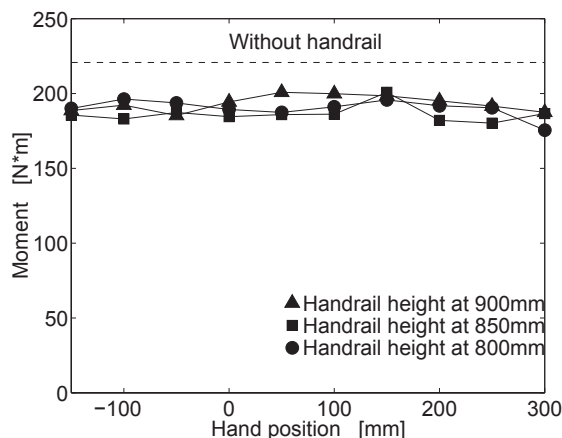


Fig.12 Effect of handrail height

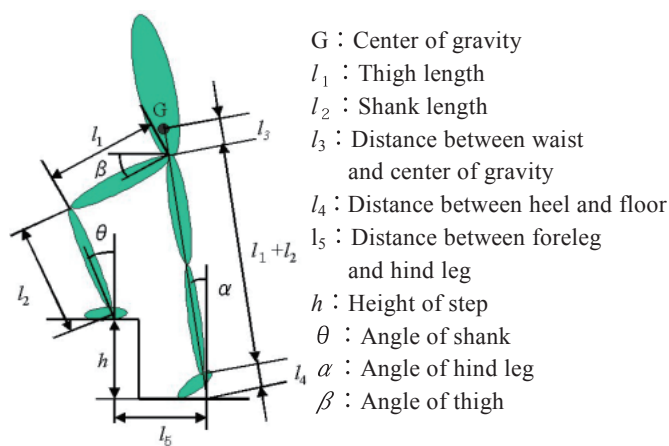
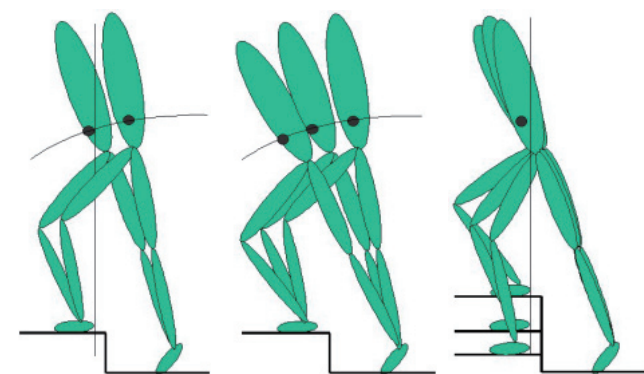


Fig.13 Mechanism model



(a)Effect of handrail (b)Handrail position (c)Step height
Fig.14 The posture in going up stairs

(3)式より、前方の脛の角度 θ は、階段の段差 h と、後方の脚の角度 α つまり重心 G の前後位置により決定されることがわかる。脚の負担は、脛の角度と床の反力により決まるが、脛の角度の影響が大きい。よって、脛の角度が求まると、脚の負担を推定することができる。

Fig.14(a)に、水平手すり有り無しの状態を示す。水平手すりが無いと、体の重心を前方の足の裏の上まで移動させるため、踵より前になる。水平手すりがあると、手すりですべて体重の一部を支えるため、重心が前方の脚の踵と手すりを持つ位置の中間にくる。よって、(3)式中の後方の脚の角度 α が小さくなるので、脛の角度 θ が小さくなる。

Fig.14(b)に、手をつく位置を変化させた状態を示す。手をつく位置が前方になると、体が前方に傾く。体が前方に傾くことで体の重心が前に移動し、(3)式中の後方の脚の角度 α が大きくなるので、脛の角度 θ が大きくなる。体の重心は半径 $l_1+l_2+l_3+l_4$ の円弧上を移動する。

Fig.14(c)に、階段の段差を変化させたモデルを示す。(3)式より段差 h が大きくなると、脛の角度 θ が大きくなる。

以上より、水平手すりの有り無し、手すりをつく位置、階段の段差が脚の負担へ及ぼす影響を、定性的にあらわすことができた。

5・2 モデルによる計算

前節で定義したモデルを用いて、脚の負担と重心位置の関係を定量的に表す。Fig.15に、重心位置と脛の角度 θ の関係を示す。重心位置は、昇りはじめる前の踵の真上を0mmとし、それより前方を正とした。手すりは使用せず、腿の長さ $l_1=0.5\text{m}$ 、脛の長さ $l_2=0.48\text{m}$ 、踵が床から浮き上がる高さ $l_4=0.05\text{m}$ とした。また、階段の段差が100mmのときの実験値を○印、段差が200mmのときを●印、段差が

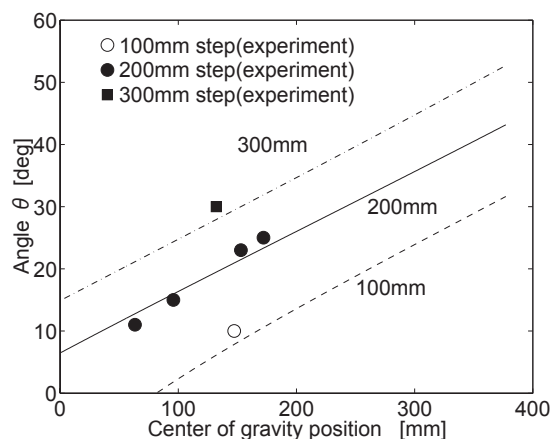


Fig.15 Relation of center of gravity and shank angle

300mmのときを■印で示す。算出する際、1つの重心位置に対し θ が2つ求まるが、重心位置が増加するにつれ β が増加するような θ を解として採用した。重心が前方の脚の真上にくる位置は、脚の間隔より300mmであるため、 θ を算出する範囲は、それより少し大きい値までとした。

Fig.15より、重心位置が前になるにつれ、脛の角度も大きくなることからわかる。このため、脚の負担が増加する。また、実験値ともほぼ一致したことから、このモデルは重心位置と脛の角度の関係をよく表している。

今回の機構モデルによる計算では、手のモデルが無いために、手すりの角度、手すりの高さや手をつく位置が脚の負担に及ぼす影響について検討することができなかった。今後、手のモデルを作成し、これらの影響を考察する必要がある。

6. 結論

本研究では、階段昇降時の水平手すりの効果を、床の反力と脛の角度から算出した脚の負担の値で評価し、次の結論を得た。

- (1) 階段を昇るときに水平な手すりを使うと、従来の手すりに比べ、脚の負担が軽減される。脚の負担が減少する要因は、水平手すりを使うことで、体の重心位置を後方に残して階段を昇ることが可能となり、脛の角度の最大値が減少することである。
- (2) 階段昇り時の手すりの効果は、手をつく位置は体の真横、階段の段差が200mmのときに、最も大きい。
- (3) 階段を降りるときにも、水平手すりを使うことにより、脚の負担が1割程度減少する。この場合、脚の負担が減少する要因は、床の反力の減少である。

参考文献

- (1) 上田俊二, 実用新案登録第3068771号, (1999), 1-11.
- (2) 有限会社創人工房, 特願336777号, (2000)
- (3) 小川鑑一, 看護動作を助ける基礎人間工学, (1999), 東京電機大学出版局, 94-98
- (4) 広川俊二, 松村公志, 膝関節のバイオメカニクスと筋肉・拮抗筋力, バイオメカニズム, (1992), 東京大学出版会, 145-155
- (5) 河村 洋・他4名, 関節角度計を用いた歩行の研究, バイオメカニズム, (1978), 東京大学出版会, 158-159
- (6) 佐藤方彦・他4名, 人間工学基準数値数式便覧, (1994), 技報堂出版, 42-43
- (7) 日本機械学会, バイオメカニクス数値シミュレーション, (1999), コロナ社, 190-228