肘を支点として起立動作を簡便・安全にする自立支援システム

Standing-up Motion Support System by Using Elbow Support Face to Adapt to Human Physical and Motion Characteristics

初雁卓郎・パラマウントベッド

三宅徳久・パラマウントベッド

Takuro HATSUKARI, Paramount Bed Co., Ltd.

Norihsa MIYAKE, Paramount Bed Co., Ltd.

樋口淳一・東北大学

平田泰久・東北大学

小菅一弘・東北大学

Jun'ichi HIGUCHI, Tohoku Univ.

Yasuhisa HIRATA, Tohoku Univ.

Kazuhiro KOSUGE, Tohoku Univ.

Key Words: *Medical and Welfare Assistance, Human Engineering, Human Interface*

論文要旨

In this article, we propose a standing-up motion support system with elbow support face for elderly people and physically-handicapped persons, which enables the comfortable and stable human posture change based on physical and motion characteristic. Effectiveness of the standing-up motion support system is evaluated by using Organoleptic Evaluation, EMG and PHM. We demonstrate the effectiveness of the system by using these evaluating measure.

1. 緒言

日本では、高齢社会の到来に伴って日常生活に支障のある高齢者が増加し続けており、平成16年の時点で400万人に達している⁽¹⁾。こうした人たちを支援するために様々な介助技術が提案されているが、代表的な概念としてボディメカニクス⁽²⁾とキネステティクス⁽³⁾がある。ボディメカニクスとは、被介助者を力学的に身体負担の少ない動作で介助動作を行う概念である。具体例として、仰臥位の人を側臥位にする体位変換を挙げる。膝を屈曲させて回転軸に対して遠い位置で力を作用させる。小さな力で大きなモーメントを出すことが可能となり、被介助者の腰の旋回動作を容易に実現できる。一方キネステティクスとは、被介助者の自立動作を支援することに注力して介助動作を行う概念である。具体例として、ボディメカニクスと同様に、仰臥位の人を側臥位にする体位変換を挙げる。片膝だけを屈曲させて本人に足を踏ん張ってもらうとともに、屈曲させた膝から大腿部を足方向に伸ばす。腰部の回転を誘導し、直接的な腰の回転ではなく下肢のねじれによって体位変換を実現している。これらの介助動作に共通しているのは、動作を分割すること、単一動作で大きな負担を支援することの2点と考えられる。ここで単一動作とは、体の1箇所に支点を作り、その点を中心に体に作用を与える動作と定義する。ボディメカニクスで言えば体幹軸を支点とした立膝先端の旋回動作、キネステティクスで言えば踵を支点とした股関節の伸展動作であり、ともに体位変換で最も大きな負担を要する腰部の旋回動作を効率的に実現している。本研究では、看護・介護現場で実施されているこうした介助技術を工学的に分析し、被介助者が自立動作可

能となる器具を提案することを目的としている。本稿では、起立時の転倒事故が多いことを勘案して、目的とする動作に起立動作を取り上げる。

まず、健康者の起立動作を考える。山本らによれば⁽⁴⁾起立動作は前傾相・前進相・伸展相に分けられるが、伸展相では膝の伸展とともに腰の伸展を行うなど、この動作の実現には連続した複合動作が必要とされる。

次に、手すりを用いた起立動作を考える。手すりには単独での起立動作が困難な人にも動作を実現できる器具として広く使われているが、主に2つの機能があると考えられる。ひとつめは、手に支点を作ることによって支持基底面を広げて安定性を向上させる機能である。ふたつめは、手に上体荷重を分散させることで下肢負担を軽減する機能である。ただし、手すりとは体幹との間で上肢が冗長であるために単一動作ではなく複合動作が必要であり、平衡感覚が低下している人の中には手すりを使っても安定性の確保が難しい人もいる。また、リウマチや変形性関節症を持つ人の中には、手先の巧緻性低下によってグリップを握ることが難しくなる人や、関節に大きな負荷を与えると痛みを生じて手すりを支点としづらくなる人もいる。

そこで本研究では、肘を支点とする起立動作支援システムを提案する。肘を支点にすると端座位からの膝の伸展を単一動作で安定して実現し、前傾姿勢と臀部離床を誘導して結果的に重心の前方移動および上方移動を可能とする。手首を支点にすると上肢が冗長自由度を持つのに対して、肘を支点にすると上肢が一意に決まるため、体幹が拘束され安定性が向上する。また、肘を支点とすることで、手先の巧緻性に依存せずに上体の支持点を設けられる。

ただし、冗長自由度をなくすことは、使い方を限定

することにつながる。肘を支点とする場合には、適正な位置に支点を設置しないと起立動作が困難にもなり得る。従来でも、肘を支点として起立することは、テーブルや床固定式の専用パッドなどで実施される事例もある。しかし、設置位置の妥当性は介助者の経験によるところが多く、数値的根拠は明確にされていない。そこで、使用者の体形を考慮し、安定性の向上と起立動作の簡便性を両立させるシステムを提案する。

本稿ではまず、人を簡易モデル化して支点とする肘の適正な位置を導出する。次に、本提案を実現するシステムを構築し、通常の起立動作および手すりを用いた起立動作と比較する。評価方法としては、安定性の評価を官能評価と PHM で、身体負担の評価を官能評価と筋電位計測にて実施し、その有効性を示す。

2. 肘を支点とする起立動作支援システム

2-1 簡易人体モデル 人の動作を定量的に表現するために、人体のモデル化を検討する。ここで、看護師や理学療法士を中心として看護・介護現場で取り入れられているキネステティクスでは、人体をマスとつながりという2つに分けて考えている。ただし、マスとは重量を持つ体の部位であり、つながりとはマスとマスをつなぐ関節部位と定義されている。キネステティクスによれば、マスは頭、腕（左右）、胴、腰、足（左右）の7部位で構成されており、本研究でもこれを模倣したモデルを考える。ただし、腕には肘、足には膝という大きな関節があり自立動作にはこの関節の活用が不可欠であることから、腕は前腕と上腕に、足は下腿と大腿に分けて11のマスで構成されているものとし、人を矢状平面上の2次元リンクモデルで考えると人体は下腿・大腿・腰・胴・頭・上腕・前腕の7部位に簡易化できる。これを、Denavit - Hartenberg の記法を用いて人体を7リンクに近似した平面モデルをFig.1に示す。起立動作時は足底部が接地したままであるため外踝を下腿部と床との接触点と見なし、その点を絶対座標系 $O_0-x_0y_0$ の原点とする。外踝を関節1として、Fig.1に示すように、順に各関節に番号をつけ、リンク座標系を定義する。ただし、各リンク座標系 $O_i-x_iy_i$ でからみたリンク i の重心位置ベクトルを s_i 、リンク $i-1$ の原点の位置ベクトルを l_i とし、リンク i 質量を m_i とする。

2-2 肘を支点とする起立動作 前腕を水平にして肘関節を支点とする場合、尺骨が前腕の広い面積を持って接触できるため接触面が安定するとともに、上腕骨が尺骨と大きな関節で支持されるため、体に対して負担が少ない動作になる。そこで、肘を支点とする起立動作が高齢者や障害者に対して有効と考える。ただし、肘関節の支持位置によっては、起立動作を抑制する方向に力が作用する。そこで、起立動作を促進しながら上体を支えられる肘支持位置を検討する。

起立動作においては、体幹を前傾させながら重心を押し上げる動作が必要である。肘を支点とした起立動作を考える際に、肘から上腕への軸力が反力として加わると仮定する。上腕と前腕のなす角が 90° 以上の場合は、反力が肩関節を後方に押し戻す方向となり、体幹が後傾する方向に作用する (Fig.2(a)参照)。逆に、

Fig. 1 Planer link model of a human

(a) Wide Angle (b) Right Angle (c) Narrow Angle
Fig.2 Standing-up Motion with Elbow Support

90° 未満の場合は肩関節を前方に押し出す方向となり、起立動作を促進する方向に作用する (Fig.2(b),(c)参照)。ただし、上腕と前腕のなす角を小さくし過ぎると軸力の方向が水平方向に近づくため、反重力方向に力を作用させることが難しくなる。そこで、2-1の簡易人体モデルで水平にした前腕に対する上腕のなす角が 90° となるとともに、膝と肘の水平方向位置が同じとなるよう肘支持位置を考える (Fig.2(b)参照)。

2-3 人の特性にあわせるシステム設定 Fig.2(b)となるような肘支持部の地上高 L_2 は下式で表される。

$$L_2 = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + \sqrt{(l_4 + l_5)^2 - l_3^2} - l_7 \quad (1)$$

ただし、 l_1 は外踝地上高、 l_2 は下腿長、 l_3 は大腿長、 $l_4 + l_5$ は大転子・肩峰長、 l_7 は肩峰・肘回転中心長、 θ_1 は鉛直軸と下腿とのなす角とする。

3. 起立動作支援システムの概要

試作した起立動作支援システムを Fig.3 に示す。本システムは昇降機能付ベッドの就寝面に設置するものとする。すると、(1)式で表される肘支持部の地上高のうち外踝地上高や下腿長はベッドで調節可能なため、本システムが人の特性にあわせるための設置高さ可変量 L_{2b} は、

$$L_{2b} = \sqrt{(l_4 + l_5)^2 - l_3^2} - l_7 \quad (2)$$

となる。60歳以上の高齢者で5%タイルから95%タイルの人まで勘案すると L_{2b} は43.6mmであることから、上下方向に50mmの可動範囲を持つ肘支持部とする。(2)式に個人寸法を適用させて起立動作した様子を Fig.4 に示す。スムーズな起立動作になることがわかる。また起立後の動作を勘案して本アイテムをベッド就

寝面設置としたことにより、足元に動作空間を確保し、転倒要因や車イスが干渉して近づけられないといった懸念事項が解消されることも特長とする。

4. 起立動作支援システムの有効性検証

4-1 評価方法 起立動作に支障のある人が自立動作を実現するためには、身体負担の低減と安定性の向上が求められる。そこで、自助具なしの起立動作、市販の手すりを有いた片手支持を用いた起立動作と3章で提案したシステムの比較評価を実施して (Fig.5 参照)、提案の有効性を示す。

(a) **官能評価** 体感的な評価として、官能評価を実施する。官能評価は動作負担と安定性について相対比較による5段階で評価を行う。ただし、被験者が健常者であることから自助具なしの起立に負担や不安定さを感じることは少ないため、片手支持手すりを基準とした相対比較とし、手すりより良ければ5点、手すりと同等であれば3点、手すりより悪ければ1点とする。また、負担の大きい動作として、臀部離床時と伸展動作時が考えられるため、2つの動作を分けて評価を実施する。

(b) **筋電位計測** 動作負担量の評価指標として一般的には、関節モーメントや筋電位を用いることが多い。本システムは、左右いずれか片側の肘を支点とすることから動作が左右対称とならないため、関節モーメントによる評価は困難と判断し、3次元動作でも計測可能な筋電位を身体負担の評価指標として用いることとする。

(c) **PHM** 本研究では、安定性の指標としてこれまで、下式で表される PHM (Posture Holding Moment) を採用してきた⁽³⁾。

$$\tau_{PHM} = \sum_j (\mathbf{r}_g - \mathbf{r}_j) \times \mathbf{F}_j \quad (3)$$

ただし、慣性座標系における人体モデルの重心位置ベクトルを $\mathbf{r}_g$ 、慣性座標系において人体モデルが外力を受ける位置ベクトルを $\mathbf{r}_j$ 、外力を $\mathbf{F}_j$ で表す。

(3)式は3次元空間でも2次元平面と同様に定義されるため、これを安定性の指標として用いることとする。

4-2 実験

(a) **官能評価** 被験者は若年健常者で男性3名、女性3名とする。各評価項目について試行は3回とする。肘を支点とした起立動作支援システムは(2)式に基づいて個人に合わせた設置位置として評価を行う。

(b) **筋電位計測** 筋電位計測は、大腿直筋、腹直筋、僧帽筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋、腕橈骨筋の6点を%MVC値で評価する。ここで、腓腹筋および脊柱起立筋についても予備実験で計測を実施したが、有意差が見られなかったため試験項目から除外してある。計測器はBIOPAC MP150システムを用い、電極にはディスポーザブル電極EL503を使用し、主力ゲインは5,000倍、ローパスフィルタは10Hz、ハイパスフィルタは500Hzとする。被験者は身長170cm、体重65kg、年齢31歳の男性健常者として、各試験項目について試行は3回とする。(a)と同様に、被験者が健常であることから、

Fig.3 Standing-up Motion Support Device

Fig.4 Standing-up Motion with Elbow Support Face

(a)Without Device (b)Hand Grip (c)Elbow Support Face

Fig.5 Standing-up Motion Support Device

本実験での比較対象は片手手すりを有いた起立動作とする。

(c) **PHM** PHMはFig.1の各回転軸にマーカを設置し、3次元動作解析装置 (Qualisys Proreflex) により各関節の軌跡を得る。また、支持点となる足部、臀部、手もしくは肘部に力センサを設置して作用力を検出する (足部、臀部: KISTLER 9286AA, 手もしくは肘部: Nitta 100M40A)。被験者は(b)と同じとして、各試験項目について試行は3回とする。

4-3 結果

(a) **官能評価** 官能評価を実施した結果について、平均点と標準偏差を評価項目別にFig.6に示す。片手支持手すりを3点で基準としていることから、臀部離床時では動作負担および安定性ともに有意差があり、肘を支点とした起立動作支援システムは有効であることがわかる。また、伸展動作時においても、統計的有意差はないが平均では上回っており、本システムの有効性が示された。以上より、起立の一連の動作において本システムが手すりよりも有効であることを官能評価により示した。

(b) **筋電位計測** 筋電位計測による身体負担の評価結果について、測定例としてEMGの時系列変化をFig.7に示す。Fig.7(a)を見るとすべての筋群において大きな変動がなく、動作負担の少ない理想的な動きをしていることがわかる。つまり、平衡感覚があれば手すりを使わない方が動作負担は小さいと考えられる。

Fig. 6 Organoleptic Evaluation of Standing-up Motion

(a) Without Device

(b) Hand Grip

(c) Elbow Support Face

Fig. 7 Measuring Example of EMG of Standing-up Motion

Fig. 7(b)(c)より、手すりなしと比べて上肢の筋負担はともに増大しているが、肘を支点とした起立では片手支持手すりによる起立と比べて腹直筋にほとんど変位がなく、前傾姿勢を保持するための筋力が大幅に低減できることがわかる。ここで、最大%EMG値の平均値および標準偏差を Fig. 8 に示す。手すりをを用いた場合は腹直筋および上腕三頭筋に顕著な増大が確認されるのに対し、肘を支点とした起立では自助具なしと比べても上肢負担にほとんど差異がないことが確認される。よって、本システムが手すりよりも小さい身体負担で起立できることが、筋電位計測により定量的に示された。

(c) PHM PHM 計測による安定性の評価結果について、起立手法別の計測例を Fig. 9 に示す。自助具なしおよび片手支持手すりでの起立動作では臀部離床時に PHM が増大し、不安定となることがわかる。これに対し、肘を支点とした起立では臀部離床時に逆に安定性が向上することがわかる。起立手法別に最大 PHM の平均値と標準偏差を Fig. 10 に示す。手すりをを用いた起立動作では自助具なしの起立動作と有意差が見られる

Fig. 8 EMG of Standing-up Motion

Fig. 9 Measuring Example of PHM

Fig. 10 PHM

のに対し、肘を支点とした起立動作支援システムは手すりをを用いた起立には有意差のある安定性向上を確認でき、自助具なしの起立動作と同等と考えられる。よって、本システムが手すりよりも安定性が向上することが PHM 計測により定量的に示された。

5. 結言

本研究では、要介助者が自立動作を可能とするための手法として、動作を分割して単一動作によって負担の大きな動作を支援するシステムを検討している。本稿では動作の例として起立動作を挙げ、肘を支点とした膝伸展の単一動作により動作を安定かつ省力化できる自立支援システムを提案した。人の身体寸法にあわせて位置を調整可能とすることを特長とし、起立・着座前後の動作も勘案したレイアウトとなる起立動作支援システムを試作した。これを既存の起立動作と比較評価し、定性的な評価として官能評価を、定量的な評価として動作負担を筋電位計測で、安定性を PHM 計測により行い、いずれの評価によっても提案したシステムが有効であることを確認した。

参考文献

- (1) “平成 16 年国民生活基礎調査”，厚生労働省。
- (2) 山本，加藤，中村：“腰痛を防ぐらくらく動作介助マニュアル”，医学書院，2002。
- (3) 氏家，阿曾，井上：“基礎看護技術 I 第 6 版”，医学書院，2005。
- (4) 徳永：“キネステティック概念を応用した体位変換の実際”，褥瘡会誌，3(3)，pp.259-267，2001。