関節モーメントと関節角に関連する要因を考慮した作業姿勢評価法

○瀬尾 明彦（首都大学東京 システムデザイン学部）

茅原 崇徳（首都大学東京 システムデザイン学部）

Posture evaluation method considering the factors related to joint moment and joint angle

Akihiko SEO (Tokyo Metropolitan University, Faculty of System Design),

Takanori CHIHARA (Tokyo Metropolitan University, Faculty of System Design)

1. 諸言

作業姿勢による身体負担評価法として、関節モーメントによるものがある。この方法は、姿勢評価の主たる要因である関節角と外力（操作力）の影響を力学的モーメントという物理量で総合的かつ定量的に評価できる。そのため、デジタルヒューマンモデル（以下、DHM）で3次元の姿勢を連続的に計測して評価できる場面では、最適姿勢や最適作業条件の探索に利用しやすい。しかし関節モーメントを用いて最適姿勢の探索を行うと、関節の可動域からみて不自然な姿勢（たとえば最大屈曲位近傍の姿勢）が選択される場合がある。そこで本研究では、関節モーメントによる姿勢評価値と関節角度による姿勢評価値を組み合わせ、最適な作業姿勢を探索する新たな評価法の検討を行う。

2. 方法

2.1 関節角の評価法

関節角の評価法として最も単純な方法は、中間位（Neutral position）からの変位角をそのまま評価値にする方法である。これは中間位が最も負担のない関節肢位であり、中間位からの変位が最少な姿勢が良い姿勢であると判断するものである。しかし、同じ変位角でも関節により負担感に差がある。そこで本研究では、全身の主要な関節(8関節18自由度)について関節角と主観的快適性との関係を調べたKeeらの文献[1]のスコア (Normalized comfort score)を参考に、各関節の自由度と関節角に応じた評価値を求める関係式と評価法を以下のように決めた。

- 1) スコアの変換と関節角との関係式の作成：Keeらのスコアは100（極めて良好）～0（極めて不良）と

なっている。本研究では関節モーメントの評価値（0%が無負荷、100%が最大負荷）と合わせるため、100から文献値のスコアを引いた値を求め、さらに関節角0度のスコアが0になる2次の回帰式を求めた。表1にその一部を示す。

- 2) 関節角に関する総合評価スコア：上記のスコアは関節別自由度別に求められるが、姿勢の評価ではそれをまとめた総合評価値が必要である。Keeらはその方法を提案していない。そこで本法では、複数の自由度を持つ関節はその二乗和の平方根をその関節のスコアとし、そのうえで対象とする複数の関節のスコアの平均値を総合評価値とした。平均値をとることで、評価値は関節数に依らず0～100点の範囲となる。

2.2 関節モーメントと関節角の複合評価

関節角の評価値は、いずれの関節も中間位に近い姿勢を良いと判断する。これに対して関節モーメントは、外力の大きさと方向に応じて選ぶ姿勢が変わる。手にかかる外力がない場合、両者はいずれも直立に近い姿勢を選ぶ。しかしたとえば手に上下方向の外力がかかる上肢姿勢を関節モーメントで評価すると、肘を伸展した肢位だけでなく肘を最大屈曲した肢位も選ぶ。これに関節角の評価値を加味すると、肘を伸展した肢位を選ぶ傾向が強くなるので、やや関節モーメントは高く

表1. 関節角に関する快適性スコア y (点)と関節角 x (度)の関係式

肩関節 屈曲 ($x=0\sim194$)	$y=3.57\times10^{-4}x^2+1.19\times10^{-1}x$
水平伸展 ($x=0\sim132$)	$y=7.35\times10^{-4}x^2+1.11\times10^{-1}x$
内旋 ($x=0\sim116$)	$y=1.58\times10^{-3}x^2+2.19\times10^{-2}x$
肘関節 屈曲 ($x=0\sim145$)	$y=-1.93\times10^{-4}x^2+1.94\times10^{-1}x$
体幹 前屈 ($x=0\sim115$)	$y=7.81\times10^{-5}x^2+4.71\times10^{-1}x$
股関節 屈曲 ($x=0\sim80$)	$y=-1.14\times10^{-3}x^2+1.11x$
膝関節 屈曲 ($x=0\sim116$)	$y=-8.90\times10^{-4}x^2+5.10\times10^{-1}x$

なるが関節の屈曲しない直立に近い姿勢が選ばれやすくなる。ただし、関節モーメントが最大モーメントの50%以上とすでに十分高くてその増加を許容できない場合は、関節角の評価は無視する必要がある。そこで本評価法では、両者の評価値の線形結合和（結合比は r 、 $0 \leq r \leq 1$ ）を用いて評価する（以下、複合評価と呼ぶ）。これにより、関節モーメントあるいは操作力が高い場合はモーメント評価値を優先し、そうでない場合は関節角の評価値を優先するようにユーザが指定することもできる。

2.3 実験方法

一般的な作業場面を想定し、腰高の作業台で立位で右上肢にて作業する時の最適作業位置を探索するシミュレーションを行った。作業面高は $90\text{cm} \pm 40\text{cm}$ 、前後位置は右肩前 $45\text{cm} \pm 20\text{cm}$ の範囲とした。操作力は、0, 24.5, 49.0Nの3条件とした。関節モーメントと関節角の評価値の結合比 r は、0（関節モーメントのみ）、0.5（両者50%ずつ）、1.0（関節角のみ）の3種類とした。シミュレーション実験は、この評価機能を我々が開発しているDHM[3]に組み込んで行った。DHMの性別は男性、身長171 cm、体重68 kg（いずれも20～40歳代の日本人成人男性の平均値）とした。

3. 結果と考察

表2に各結合比でのコンター図と最適点での姿勢を示す。コンター図は、評価値が高い（負担が高い）ところを濃い色、評価値が低い（負担が低い）ところを薄い色としてい

る。ただし同じコンター図の濃淡は相対値である。関節モーメントによる評価値の詳細は既報[3]の通りであるが、基本的に関節モーメント比（最大モーメントに対する比、単位%）の最大値を用いている。最適点は、滑降シンプレックス法で求めた評価値が最少になる前後位置・作業面高とその評価値である。

表2に示すように、関節角のみの評価($r=1.0$)では上肢を前に伸ばした姿勢が選ばれるが、関節モーメントのみの評

価($r=0.0$)ではいずれの操作力でも手が体に近い姿勢が選ばれている。これに対して複合評価($r=0.5$)では、操作力に応じて関節角評価に近い姿勢から徐々に関節モーメント評価に近い姿勢が選ばれるようになっている。複合評価での r は0.5と一定にしたが、関節角の評価値は操作力によらず同じ値であるのに対して関節モーメントの評価値は操作力に応じて高くなるため、このような結果になったと考えられる。

4. 結 言

関節モーメントと関節角の両方を考慮した姿勢評価が可能な評価法を構築した。構築した評価法で立位での上肢姿勢評価のシミュレーションを行い、その妥当性を確認した。

参考文献

- 1) Kee, D., Karwowski, W., "The boundaries for joint angles of isocomfort for sitting and standing males based on perceived comfort of static joint postures", Ergonomics, Vol.44, No.6, pp.614-648, 2001
- 2) Kee, D., Karwowski, W., "LUBA: an assessment technique for postural loading on the upper body based on joint motion discomfort and maximum holding time", Applied Ergonomics, Vol.32, pp.357-366, 2001
- 3) 瀬尾明彦, 門松誠, 茅原崇徳, "最適作業条件探索のための身体負荷評価法と可視化システム", 日本経営工学会2015年度秋季大会, pp.262-263, 2015

表2. 各結合比 r での評価結果のコンター図と最適点での姿勢

関節角評価 ($r=1.0$)		操作力		
		0 N (0 kgf)	24.5 N (2.5 kgf)	49 N (5.0 kgf)
(50.9, 102.5, 8.0)	関節モーメント評価 ($r=0$)	(37.1, 128.6, 12.8)	(25.0, 130, 19.3)	(25.0, 66.5, 29.6)
	複合評価 ($r=0.5$)	(49.1, 103.1, 12.5)	(31.5, 85.7, 15.6)	(25.0, 67.0, 20.5)

(注) 表中の()内の数字は、評価値最少の前後位置(cm), 作業面高(cm), 評価値(点, %)を示す。