作業域内での身体負荷の可視化と低負荷動作経路の探索

○瀬尾 明彦（東京都立大学 システムデザイン学部）

平内 和樹（東京都立大学大学院 システムデザイン研究科）

倉元 昭季（東京工業大学 工学院 システム制御系）

Visualization of physical workload and finding lower-load path in work area

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

Kazuki HIRANAI (Graduate School of Systems Design, Tokyo Metropolitan University),

Akisue KURAMOTO (School of Engineering, Tokyo Institute of Technology)

1. はじめに

動作を伴う作業の始点と終点を指定して身体負荷が最小となる動作経路を生成する方法は、ロボットアームや人型ロボットでの動作生成で広く利用されている。この方法は、1つの最適な経路を生成することが目的である。そのため、最適な経路を外れた場合にどのように負担が増えるかといった動作の許容範囲に関する情報が得られない。また、現実の人の動作では個人内でもばらつきがあり、動作経路にはある程度の幅がある。

そこで本研究では、手での荷物の持ち上げと持ち下げの動作による身体負荷を作業域内で可視化する方法を利用し、その領域内で荷物を取り扱う動作を低負荷で行う経路を求める。この経路と領域内の負荷を合わせて表示することで、作業域内の経路の途中の負担の変化や最適経路を外れることの影響を可視化することを目的とする。

2. 方法

1) 作業領域内の身体負荷の可視化方法

人はある位置に立ち、ある点（始点）から荷物をある点（終点）に向かって運ぶ場面を想定する。その始点および終点が、人の立ち位置からみて前後左右上下に変動し、それぞれの点から作業を行う場合の作業経路を推定する。実作業では始点や終点および作業経路は3次元空間を自由に選択しうるが、本稿では矢状面（人からみて上下および前後方向を含む平面）での動作のみを想定することとする。また、本来の荷物の持ち上げ作業は一連の動作として経路が生成されるが、本稿では、通常の荷物取り扱い作業で想定されるようなゆっくりとした作業動作を想定し、操作平面状の任意の点で荷物を保持する前屈あるいは中腰の姿勢を自動生成する。生成する姿勢は、事前にモーショ

ンキャプチャシステムで取得した任意の手位置での姿勢のテンプレートをもとに、全身姿勢の補間生成・逆運動学による手位置合わせ・重心位置補正を行って生成する。

作業域は、始点と終点を含む広めの四角形の領域とし、その両辺を10等分した格子のすべての交点の位置で姿勢生成を行い、各交点での関節のトルク比（その体格・姿勢で推定される関節の最大発揮トルクに対するその姿勢での姿勢保持に必要なトルクの%値）を求める。その値をコンター図に示すことで、身体負荷の可視化を行う。

2) 動作経路の生成方法

上記の作業域において、手位置をある始点から終点に動かす際の身体負荷が最低となる経路を探す手続きは、一般には経路探索問題に帰着される。経路探索は、経路を多数のノードが結合されたグラフで表し、ノード間の移動コストの和が最小になる経路を探し出す方法である。本稿では経路探索法としてA*アルゴリズムを利用した。本法では、ゴールまでの距離をヒューリスティック関数として経路コストの計算に組み入れることで、ゴールに近い経路を優先的に探索して計算効率を上げる。

始点ノードから、あるノード n を通して終点ノードにたどり着くとき、最短経路のコスト $f^*(n)$ は以下のようにあらわされる：

$$f^*(n) = g^*(n) + h^*(n) \quad (1)$$

ここで、 $g^*(n)$ は始点ノードからノード n までの最小コスト、 $h^*(n)$ はノード n から終点ノードまでの最小コストを示すヒューリスティック関数である。最小コストとなる $g^*(n)$ と $h^*(n)$ は事前には得られないので、まずは任意の経路での $g(n)$ と $h(n)$ を求めておき（つまり、 $f(n) = g(n) + h(n)$ とする）、そこから順次計算して最小となるコストの経路を求めていくことになる。

あるノード n の隣接ノードを m とし、その間の移動コストを $COST(n, m)$ と表記すると、式(1)は以下のように表記できる：

$$f(m) = g(n) + COST(n, m) + h(n) \quad (2)$$

A^* の場合、そのアルゴリズムの制約として $COST(n, m) \geq 0$ でなければならない。

本研究では、作業域内の格子の交点を経路探索のノードとし、始点から終点への経路を探索する（交点間の移動は斜め方向の含めた8方向）。 A^* による経路は、ノード間の移動コスト $COST(n, m)$ とヒューリスティック関数 $h(n)$ の決め方で結果が変わる。今回のモデルでは、経路間コストに両ノードに手位置があるときのトルク比の平均値と両ノード間距離、ヒューリスティック関数は、単純に所定のノードから終点までのユークリッド距離を用いた。これにより、トルク比が低く（つまり身体負荷が低く）、移動距離が短い経路が選択されるようになる。ただし移動コストとして距離とトルク比という異なる物理量を組み合わせるので、トルク比によるコストに重み係数をかけることにした。つまり、あるノード n から m に移動するときのコストは以下の式で表せる：

$$COST(n, m) = d(n, m) + w(TR_n + TR_m)/2 \quad (3)$$

ここで、 $d(n, m)$ はノード n と m の間のユークリッド距離、 TR_n と TR_m はノード n と m での姿勢のある関節のトルク比である。ここで、 $w = 0$ とすると単純に始点から終点の直線距離が経路になるが、適切な大きさの正の w を用いることでトルク比の高い領域を避ける経路が採択されるようになる。

3. 計算例

前述のアルゴリズムを研究室で開発しているデジタルヒューマンに組み込み、荷物の持ち上げ下げ領域の負担の可視化と動作経路の計算を試みた。荷物は5 kgの荷物とし、体の正面で両手保持とした。始点は床面から高さ50 cm、両足中心から前方50 cm、終点は床面から高さ150 cm、両足中心から前方70 cmとした。作業者は男性、年齢45歳、身長172cm、体重69 kgとした。

図1に、負荷の評価値として肩関節と腰部（第5腰椎仙椎間）のトルク比を用いた結果を示す。作業域は上下45～155 cm、前後30～70 cmの範囲で、相対的に濃い色ほど負荷が高いことを示す。経路は、始点(Start)から終点(End)への持ち上げ

と、終点(End)から始点(Start)への持ち下げの両方を求めて示している。式(3)の w は1.0とした。式(4)において、距離は始点・終点間距離で標準化、トルク比は作業域内の最小値と最大値で標準化した値をそれぞれ用いた。

図1に示すとおり、肩関節トルク比は上遠方、腰部関節は下遠方がそれぞれ高値となった。経路については、肩関節では持ち上げは真上に持ち上げる経路、持ち下げはいったん手元に引き寄せてから前におろす経路となった。腰部関節では逆に、持ち上げは手元に寄せてから前に押し出す経路、降ろすほうはほぼまっすぐに下におろす経路となった。

(a) 肩関節トルク比 (b) 腰部トルク比
図1 負荷領域と経路

4. 考察

結果に示した通り、身体負荷の表示と動作経路の関係が合わせて可視化され、本法により領域内の低負荷の位置を通る経路が選択されることが示された。経路は、使用する関節や持ち上げ下げにより明らかに異なる経路が得られた。これは、経路コストとヒューリスティック関数との関係で、高トルク比領域から低トルク比領域への移動はトルク比の低下が大きい経路、逆の場合はトルク比の変化が小さい経路が選ばれるためである。このように関節によって異なる経路が選ばれることは、作業を繰り返す際に現れる動作のばらつきの評価に利用できる可能性がある。今後は、多彩な条件での動作経路推定への適用などを進める予定である。

本研究は科研費19K04922の助成を受けて行った。