

# 人間の自然な角曲がり動作戦略の分類 —装着型ロボットに求められる矢状面外関節動作範囲の提案—

Classification of the Gait Motion when Turning Corner Naturally  
-Range of motion of hip joint on the out-of-sagittal plane required for wearable robot-

正 ○秋山 靖博 (名古屋大) 戸田 均 (三重県警) 小倉 崇生 (三重県警)  
正 山田 陽滋 (名古屋大) 正 岡本 正吾 (名古屋大)

Yasuhiro AKIYAMA, Nagoya University, akiyama-yasuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp  
Hitoshi TODA, Mie Prefectural Police,  
Takao OGURA, Mie Prefectural Police,  
Yoji YAMADA, Nagoya University,  
Shogo OKAMOTO, Nagoya University,

The curving motion in the daily living environment was not analyzed enough. However, such out-of-sagittal plane motion is required for a wearable assistant robot to be used in such complex environment. Thus, in this study, various natural turning motion of the human was recorded using corner paths with different radius and different stepping timing. As a result of cluster analysis using maximum and minimum pelvis and lumbar angle as the representative parameters of the whole turning motion, five turning strategies, which were also characterized by the range of motion of hip rotation angles, were identified. In addition, the range of motion of hip joint which is required for corner turning became clear.

**Key Words:** natural turning motion, gait analysis, cluster analysis

## 1. 緒言

### 1.1 研究の背景

装着型アシストロボットの用途は、トレッドミル上でのリハビリテーションから施設内での歩行練習、さらには実社会での日常生活補助へと拡大しつつある。それにより、装着状態で行くと想定される動作も多様性を増しているが、装着型ロボットの構造およびアルゴリズムはそうした様々な動作には必ずしも十分に対応できていない。具体的には、トレッドミル上では直進歩行のみを行うため矢状面上の関節屈伸運動が支配的であった[1]が、日常生活環境では角曲がりや障害物回避に伴う方向転換が頻繁に発生すると考えられ[2, 3]、通常であれば股関節の内外旋、内外転が生じる。直進動作であれば矢状面外の自由度を拘束しても歩行は可能であったが、そうした自由度配置では方向転換は困難であり、使用に際し著しい不便と危険が伴う。そのため、装着型ロボットの日常生活環境の普及には、そうしたリスクを解消し、想定される幅広い生活動作に対して適応することが求められる。

しかし、そうした多様な歩行動作に際し求められる関節自由度および動作範囲についての研究は十分になされておらず、ロボットに求められる仕様は明らかではない。また、直進歩行に比べ方向変換動作はカーブに差し掛かるタイミングや回転半径が変数となるためばらつきが大きく、さらに個人差もあるため代表的動作を抽出することが容易ではない。これまで、180°の旋回[4]や直角コーナー[5]等の特定の条件下で動作の分析が行われた例はあるが、そうした研究では歩行経路やステップの位置を指定することが一般的であり、自然な角曲がり動作は対象となっていない。一方、特定の歩行ルートを設定しない実験も行われている[6]が、そうした研究では具体的な関節角度パターンは計測されていない。そのため、装着型ロボットのハードウェアおよびソフトウェア開発の基礎となる角曲がり時の歩行戦略、関節動作域を明らかにすることが求められている。

### 1.2 本研究の目的

実験室環境に設置した半径の異なる複数のコーナーを用いて、歩行経路、速度を指定しない条件下における被験者の自然な角曲がりを計測し、その際に生じる主に矢状面外方向の関節動作を明らかにする。さらに、ステップ位置のばらつき等により生じる角曲がり動作の多様性の存在を踏まえ、統計的手法により代表的な角曲がり時関節動作戦略を特定するとともに、それら戦略の特徴を明らかにする。

## 2. 歩行実験

本実験は、名古屋大学工学部倫理部会の承認のもと行った。

### 2.1 実験装置

角曲がり動作を計測するため、図1に示す複数の歩行路を床面にマークした。コーナーは、旋回半径の影響を考慮するため小カーブ(R=0.5 m)、大カーブ(R=1.0 m)を用い、それに直線を加えた3種類の歩行路を使用した。これらはいずれも十分な助走区間を持つ。計測区間にはモーションキャプチャ(Motion Analysis社製、MAC 3D System)を設置し、動作計測を行った。また、被験者の足底部には6軸フォースプレート(テック技販社製、M3D-FP-U)を装着し、床反力を計測した。

### 2.2 被験者とプロトコル

本実験の被験者は、公募により募った成人男性12名(21.2±1.7歳, 172.4±3.6 cm, 61.3±6.9 kg)である。被験者は、スポーツ用のアンダーウェアを着用した上で計測機器類を装着し、歩行路を繰り返し歩行する。その際、使用するマーク(直進、小コーナーまたは大コーナー)の順番は被験者ごとにランダムに選択された。また、コーナー旋回の試行では、コーナーに対するステップの位置が旋回動作に影響すると考えられるため、歩行を開始する脚を左右ランダムに決定し、同数

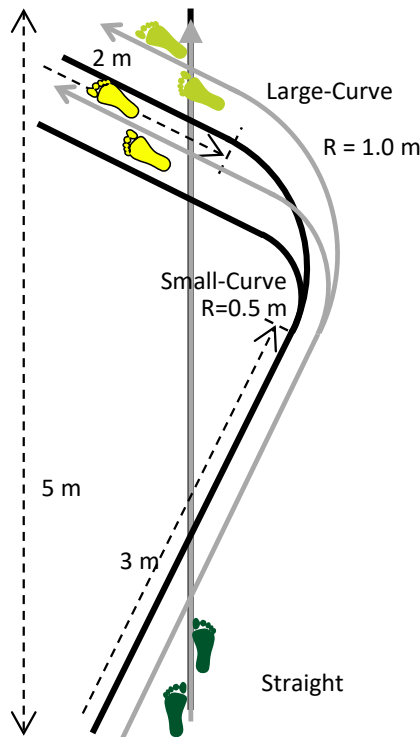


Fig. 1 Walking lane

の試行を行った。そのため、各被験者に対して直進 10 試行、角曲がりは半径ごとに各 20 試行の合計 50 試行を計測した。角曲がり時は、マークの内部に踏み込まずにコーナーを曲がるよう指示を与えた。歩行開始位置は条件ごとにマーク付近に固定し、試行間、被験者間で共通とした。一方、歩行開始後の歩行経路および歩行速度は被験者の自由とした。

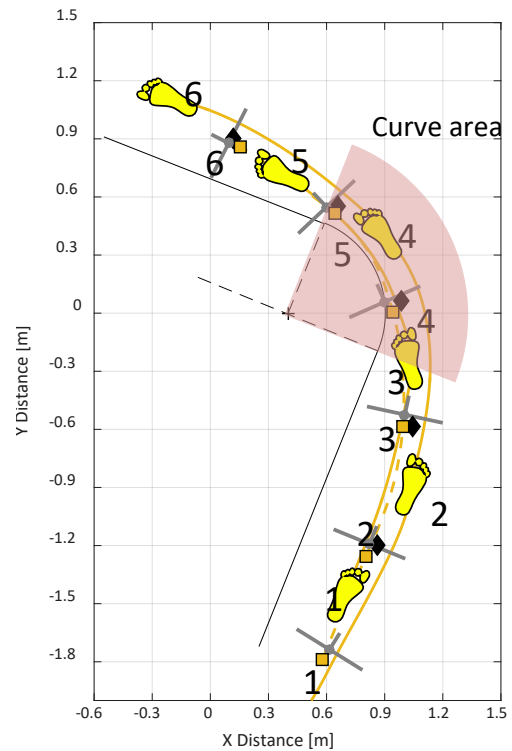
### 2.3 解析方法

被験者の動作は、モーションキャプチャおよびフォースプレートにより 100 Hz で計測し、6 Hz の Butterworth フィルタを用いて平滑化した。筋骨格ソフトウェア (Mulscolographics 社製, SIMM) を用いて被験者の姿勢および関節動作を推定した。実際の旋回動作の開始・終了地点は被験者および試行ごとに異なり、多くの場合それらは明確に定義することが困難であるため、統一的な評価のために四分円のコーナー部分の歩容のみを対象として解析を行った。

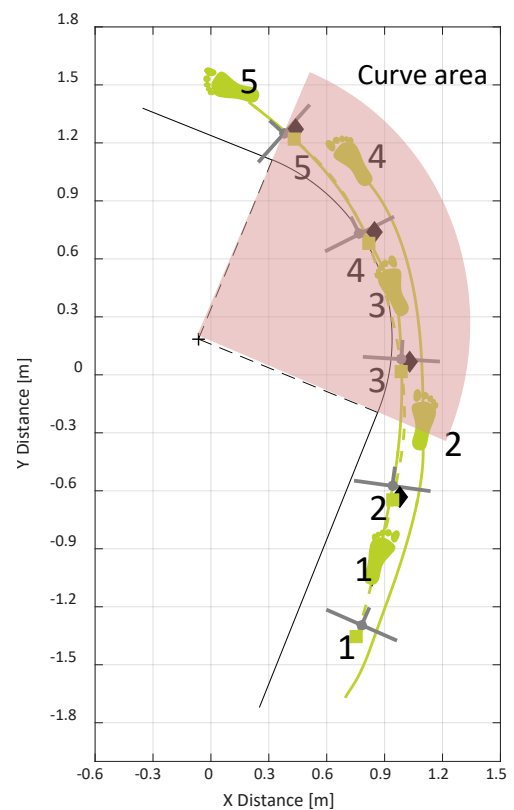
また、角曲がり動作戦略の違いは関節角度パターンに反映されると考えられるが、同時に関節角度パターンはステップのタイミングとその時の旋回の進行程度に大きく影響されるため、歩容イベント等により正規化した関節角度パターンを直接比較することで動作戦略を同定することは困難である。そのため、各試行を代表するパラメータとして、コーナー領域における関節角度および姿勢角の最大/最小値を抽出した。これは、関節動作範囲を評価する上でも適切な指標である。

さらに、代表的な角曲がり戦略を明らかにするため、骨盤の最大内傾角度、最大前傾角度および腰椎の最大旋回角度を角曲がり動作の代表的なパラメータとして用い、Ward's 法によるクラスタ分析によって角曲がり戦略を分類した。これにより 5 グループを作成し、関節動作域を比較した。クラスタ分析に際しては、同時にすべての被験者、条件の角曲がり試行を対象とした。

最後に、生成された各グループについて前述の姿勢パラメ



(a) Small radius corner



(b) Large radius corner

Fig. 2 Stepping motions

ータについて Steel-Dwass 検定による多群比較を行い、各グループの角曲がり動作戦略の特徴を抽出した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 歩行経路

被験者の歩行経路の例を図 2 に示す。実験においては概ねマークに沿った歩行が観察されたものの、歩行経路を指示しなかったために主に被験者ごとに歩行経路のばらつきがみられた。そのため、コーナー部分における歩行経路の曲率は、小カーブで 0.6–2.2 m, 大カーブで 1.1–2 m の範囲で分布した。歩行速度の平均と標準偏差は、骨盤部で  $1.23 \pm 0.14$  m/s (大カーブ) および  $1.17 \pm 0.14$  m/s (小カーブ) であった。

#### 3.2 角曲がり戦略の分類

クラスタ分析の結果を図 3 に示す。各グループに属する試行数は 126, 269, 115, 24, 36 であり、グループ 4, 5 に属する試行は顕著に少なかった。また、多くの被験者の試行はカーブ径に関わらず 2 グループにまたがり、グループ 4 および 5 に属する被験者についても同様の傾向がみられた一方、これらの 2 グループに主に属する被験者はそれぞれ 1 人であった。そのため、グループ 4, 5 は特定の被験者に固有の角曲がり戦略であった可能性がある。また、被験者の半数はカーブ径によって異なる戦略を用いる傾向がみられたが、全被験者の結果を総合すると、各グループを構成する試行が特定のカーブ径に偏る傾向は見られなかった。

各グループの差異は主に腰椎の最大旋回角度に見られ、グループ 1–5 の順で旋回角度が大きくなった。今回はカーブ時に視界が妨げられることがなかったため、すべてのケースで上体は進行方向であるカーブ出口方向に旋回したが、番号の高いグループにおいては上体がより強くカーブ出口側に向いた。こうした上体動作は旋回時に一般にみられるものである [7]。

#### 3.3 角曲がり戦略の特徴

各グループにおいては、クラスタ分析に用いた 3 つの指標に加え、複数の関節の最大/最小角度においても有意な差がみられた。グループ間の差は矢状面上の関節屈曲角度についても見られたが、各グループの角曲がり動作戦略は、矢状面外関節角度で特徴づけられた。特に、骨盤の旋回に必須である、股関節の内外旋にはグループ間で顕著な差がみられた。また、股関節の内外旋パターンにはパラメータごとに一定の法則がみられ、旋回方向に対して内足の Heel Contact (HC) 時付近で両足の最大外旋, 外足の HC 時付近で最大内旋が観察された。これらの動作は、骨盤および前足を旋回方向に向ける役割を果たしており、足底の滑りを伴わない場合には旋回に必須の動作である。

これらを考慮した各グループの角曲がり戦略の特徴を図 4 に示す。グループ 1, 2 は他グループに比較して内旋が少なく、内足ステップ時の両足外旋による旋回が大きいと考えられる。一方、グループ 3, 4, 5 は内旋角度が大きく、外足ステップ時の旋回が示唆されるが、グループ間で両足の内旋角度に差がみられ、それらがグループの特徴となっている。中でもサンプル数の多いグループ 3 では、外足の内旋が強くみられる結果となった。これに対しグループ 1, 2 では、グループ間で外旋角度の大きな差は見られず、両者の差は骨盤内傾角度に現れた。グループ 1 においては骨盤最大内傾角度が他のほとんどのグループよりも優位に大きく、体幹を大きく内傾させて角を曲がる動作がみられた。

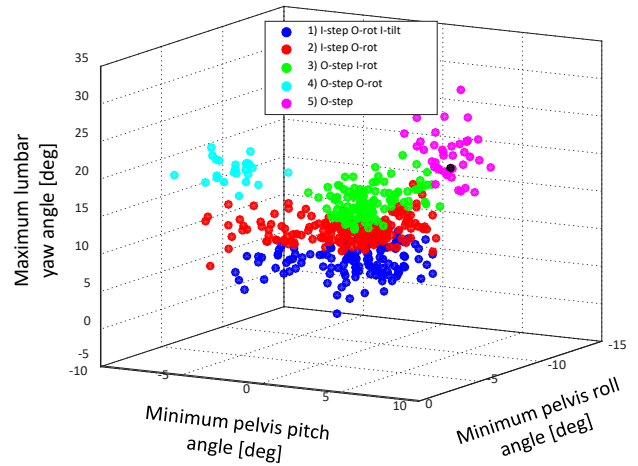


Fig. 3 Distribution of curving strategies

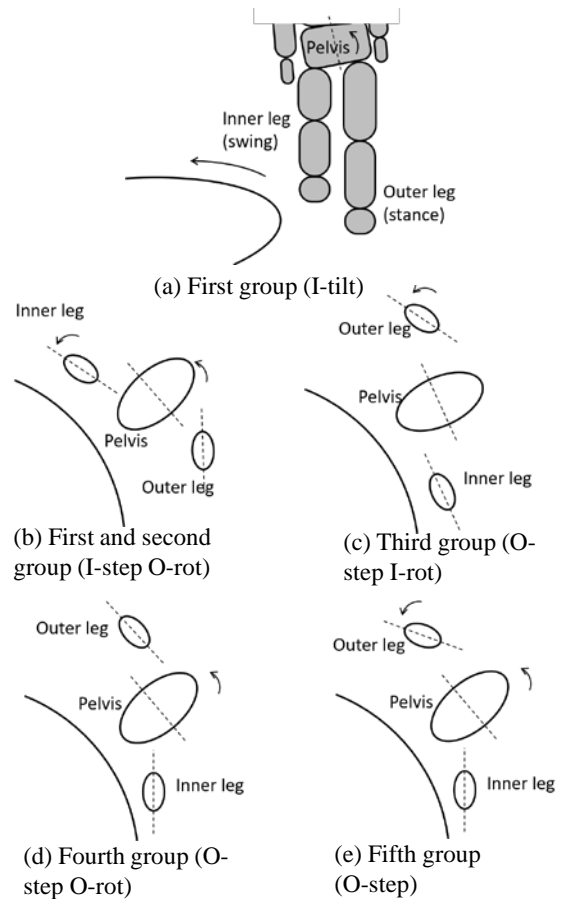


Fig. 4 Curving strategies

#### 3.4 角曲がり時における関節可動域

各角曲がり戦略における代表的な矢状面外の最大/最小関節角度を表 1 に示す。グループ間による差はあるものの、股関節外旋は  $30^\circ$ , 内旋は  $10^\circ$ , 外転は  $15^\circ$  以上におよんでいる。これは、直進時には内外旋, 内外転がたかだか  $10^\circ$  程度であることとは対照的である [8]。

Table 1 Range of motion of lower leg joints

			Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
Inner leg	Hip rot	max	3.47 ± 4.03°	3.57 ± 5.86	3.40 ± 5.01	6.31 ± 4.09	4.58 ± 2.70
		min	-31.40 ± 6.08	-33.56 ± 7.42	-28.48 ± 8.03	-32.10 ± 4.17	-26.18 ± 3.26
	Hip add	max	4.95 ± 2.46	6.48 ± 3.23	5.50 ± 2.63	10.00 ± 4.70	2.58 ± 1.43
		min	-10.41 ± 3.93	-8.82 ± 3.38	-8.17 ± 1.64	-9.35 ± 2.10	-7.98 ± 2.18
Outer leg	Hip rot	max	-1.70 ± 5.03	0.66 ± 4.82	3.13 ± 5.95	-3.39 ± 4.73	2.77 ± 3.22
		min	-29.55 ± 8.03	-29.93 ± 6.93	-25.99 ± 6.51	-28.57 ± 3.90	-27.13 ± 2.65
	Hip add	max	2.01 ± 4.29	1.44 ± 3.98	1.67 ± 3.76	-4.15 ± 3.21	3.25 ± 1.91
		min	-10.39 ± 2.39	-11.18 ± 2.87	-10.33 ± 3.18	-16.58 ± 2.94	-7.93 ± 1.75

#### 4. 結言

本研究では、人間の自然な角曲がり動作における姿勢および関節角度パターンを計測し、角曲がり動作を代表するパラメータとして骨盤傾斜角度および腰椎旋回角度を用いてクラスタ分析により代表的な角曲がり動作戦略の抽出を行った。また、装着型ロボットの旋回を想定し、角曲がり時の矢状面外方向の関節動作範囲を計測した。

#### 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 26750121 の助成を受けたものです。

#### 文 献

- [1] J. Hidler, D. Nichols, M. Pelliccio, K. Brady, D. D. Campbell, J. H. Kahn, and T. G. Hornby, "Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the lokomat in subacute stroke," *Neurorehabil Neural Repair*, vol. 23, no. 1, pp. 5–13, 2009.
- [2] Z. Zhou, X. Chen, Y.-C. Chung, Z. He, T. X. Han, J. M. Keller, "Activity analysis, summarization, and visualization for indoor human activity monitoring," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 18, no. 11, pp. 1489–1498, 2008.
- [3] B. C. Glaister, G. C. Bernatz, G. K. Klute, M. S. Orendurff, "Video task analysis of turning during activities of daily living," *Gait & posture*, vol. 25, no. 2, pp. 289–294, 2007.
- [4] K. Hase and R. B. Stein, "Turning strategies during human walking," *Journal of Neurophysiology*, no. 81, pp. 2914–2922, 1999.
- [5] M. Taylor, P. Dabnichki, S. Strike, "A three-dimensional biomechanical comparison between turning strategies during the stance phase of walking," *Human Movement Science*, vol. 24, pp. 558–573, 2005.
- [6] A.-H. Olivier and A. Cretual, "Velocity/curvature relations along a single turn in human locomotion," *Neuroscience Letters*, no. 412, pp. 148–153, 2007.
- [7] A. E. Patla, A. Adkin, T. Ballard, "Online steering: coordination and control of body center of mass, head and body reorientation," *Experimental brain research*, vol. 129, no. 4, pp. 629–634, 1999.
- [8] S. Ounpuu, J. Gage, and R. Davis, "Three-dimensional lower extremity joint kinetics in normal pediatric gait." *Journal of Pediatric Orthopaedics*, vol. 11, no. 3, pp. 341–349, 1991.