

カオス解析による作業のための歩行路環境の 安全性評価に関する研究

正員 田中太氏* 正員 篠田岳思*

Safety Assessment for Environment of Working Walkway by Chaos Analysis on Instability Motion of Human Body

by Takashi Tanaka, *Member* Takeshi Shinoda, *Member*

Summary

The Japanese occupational accidents has been continued to decrease since the Industrial Safety and Health Law was established in 1972. But, in recent years, number of occupational accident at shipyard is shifting from approximately flat to increase, and also the probability of death accidents is still high as compared with them in other industries. Besides, Industrial Safety and Health Law was revised in 2005, this law recommends implementation of risk assessments for promotion of occupational safety management to the broad industrial sectors.

The falling type accident is deal in this paper mainly, because this type of accident is happen 30% of occupational accidents in shipyard. This feature of falling type accident breaks out during walking on circumstances of ship construction fields, according to analysis of our constructed occupational accident database.

For understanding the factors of introduction to harmful walking mode, experiment on transferring platform mock-up is attempted. And the motion of center of gravity of human body under some harmful walking environmental condition is measured by motion capture technology on video imaging analysis. The relationship with the fluctuation property of traces of center of gravity of human body and walking environment is found out, through these experiments and fluctuation analysis by method of recurrence plot on applied chaos theory. This numerical calculating methodology is proposed as evaluation of safety of walking environment on improvement of occupational health at shipyard.

1. 結 言

1972年の労働安全衛生法の制定以降今まで、日本では労働災害は減少を続けてきたが、ここ数年、造船業においては労働災害は横ばいから若干増加傾向に転じており、他の産業と比較して労働災害の発生率は依然として高い状況である。さらに、平成17年(2005年)に制定された改正労働安全衛生法では、職場における危険源をリスクアセスメントにより評価して安全対策や是正処置を実施することが産業界へ求められる様に変化してきており、リスクアセスメントによる安全な職場作りが課題になってきている。

ここでは、造船所での労働災害において転倒、墜落・転落災害の要因となる身体バランスの崩壊を誘発する不十分な足場や作業用歩行路、また、板継ぎや配材、フレームの取付等の曲がり外板上での作業等の造船所における歩行路環境について安全性評価の検討を行う。歩行路の環境安全性評価の検討には、数種の異なる歩行路環境を設定してモックアッ

プを作り歩行実験を行い、歩行動作をモーションキャプチャにより取得する。次に、歩行中の身体のゆらぎをカオス理論を用いて解析し、平坦路上の安全な歩行動作と他の異なる歩行路環境での歩行動作との比較にパターンマッチングの手法を用い、違いを不一致度として数量化し、この不一致度により歩行路環境の評価を試みた。

2. 歩行路の環境安全性評価のための歩行実験

造船所での労働災害は日本造船工業会での取り纏めによる「休業災害(含死亡)調査報告」によると年間当たり百数十件程度報告されているが、著者らがこの労働災害報告書から構築した労働災害データベースの解析¹⁾により得たリスクマトリクス分析によると、身体バランスの崩壊による転倒事故や、転倒が引き金となった墜落・転落災害等もある。また、災害発生場所には、作業用足場だけでなく曲がり外板での歩行中の滑りやブロック端部や開口部での歩行中によるものがあり、ここでは作業者に遭遇の可能性のある歩行路環境の安全性評価について検討を行う。

2.1 モーション・キャプチャによる歩行動作の計測

Fig.1 に歩行路のモックアップ実験の概要を示す。歩行動

* 九州大学大学院工学研究院

作中の身体各部位の位置座標の時系列データの取得にはモーション・キャプチャ法を用いる。モーション・キャプチャ法では被験者に反射マークを取付け、ビデオ撮影し、この反射マークの映像を画像解析することにより被験者の動作を取得する。Fig.1(a)には被験者に取付けた反射マークの位置を示すが、ここでは、身体全体の動きを取得し、重心位置のデータを取得するために、身体各部分(19点)の動作中心位置に球形の反射マークを付けた。次に Fig.1(b)に示すように、この被験者にモックアップ上を歩行してもらい、歩行の様子を2方向から2台のビデオカメラを用いて撮影(30フレーム/秒)し、反射マークの2次元ビデオ画像データを付録に示すDLT(Direct Liner Transformation)法により3次元の歩行動作として再構成して取得する。2方向からのビデオ画像を

3次元座標として算出するには、カメラから反射マークまでの距離、カメラの設置角度、レンズの焦点距離等のデータを設定する必要があるが、これらを予め設定することは困難であるため、DLT法ではコントロールポイントと呼ばれる実距離が計測可能な3次元座標点を基準点として多数設置しておき、これらを身体に取り付けた反射マークと同時に撮影することにより、反射マークの位置座標を計算により求める。

なお、歩行動作の解析には身体重心のデータを用いるが、これにはモーション・キャプチャ法により得られた身体各部位の位置座標の時系列データを身体部位の質量比から身体重心のデータに換算した。また身体重心の補正には被験者の体重と身長に換算した身体部分係数(Body Segment Inertia Parameters)を用いた。

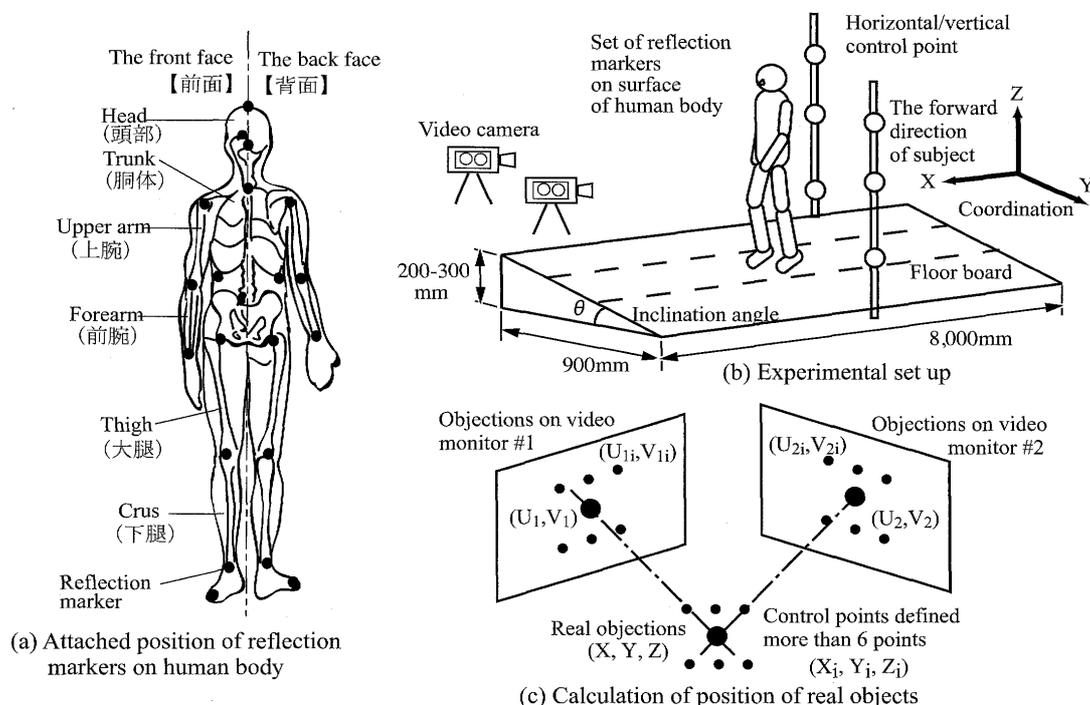


Fig.1 Experimental set up for studying human walking and 3D data acquisition by the DLT method

Table1 Experimental conditions of the mock-up of walkway

Variation of the floor inclination		Variation of the walkway width		Variation of the walking tempo	
Nominal designation	Condition	Width	Condition	Tempo	Condition
Flat	Horizontal condition	10cm	Restriction of the walkway width to 10cm~30cm	30bpm	Walking at 30~130 bpm (beat per minute)
Left1	Inclination to the left or right side of the forward direction of subject (inclination angle 13deg.)	15cm		40bpm	
Right1		20cm		.	
Left2	Ditto. with a bigger inclination (inclination angle 20deg.)	30cm		.	
Right2		.	130bpm		
Slippery condition		Control of ceiling height			
Nominal designation	Condition	Height	Condition		
Slip1	Plywood board	High	Ceiling height 166cm		
Slip2	Detergent between polyethylene vinyl sheets on a board	Middle	154cm		
		Low	127cm		

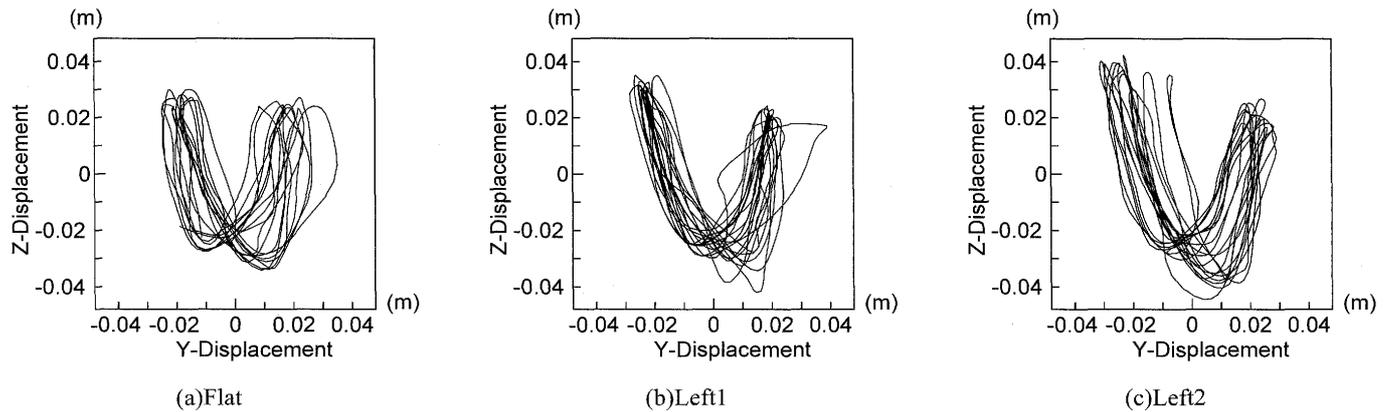


Fig.2 Profiles of center of gravity of body on y-z plane

2.2 歩行路環境と歩行時の身体バランス

歩行路環境が歩行時の身体バランスに与える影響について、歩行路のモックアップを作成して歩行実験により検討を行う。歩行路環境の中での身体のバランス崩壊に関する要因としては、歩行路上のケーブル、ホース類、接合部材への躓き、曲面のある大組ブロックの外板上および足場での傾斜、外板上に取り付けるために規則的に配材された補強桁での歩行、靴底の劣化、グラインダーの削り粉や油の靴裏への付着による滑り、ブロックや交通装置等からなる天井をくぐる際の身体の屈み移動があり、これらに着目して、歩行時の身体バランスに影響を及ぼすと考えられる歩行路の環境の要因として Table1 に示す実験条件をモックアップにより再現して歩行実験を行った。なお、躓きについては、実験による再現が難しいため、実験条件から削除した。

歩行実験での計測例として、床板の傾斜と歩行進路を拘束した場合の負荷影響の下での実験における身体重心の軌跡を y-z 平面上に写像した軌跡の外形を Fig.2 に示す。軌跡は、床板が水平な場合には 8 の字の規則的なリズムに従って推移するが、床板に傾斜がある場合には規則的なリズムがゆらいていることがわかる²⁾。このため、歩行時の身体重心の軌跡のゆらぎと歩行路環境の関係を把握することにより、歩行路環境の安全性評価について検討を行う。

3. カオス理論を適用した歩行動作のゆらぎ解析

歩行時の身体重心の軌跡のゆらぎを解析するために、ここではカオス理論におけるリカレンスプロット³⁾を用いて 2 次元画素上にプロットとしてゆらぎを抽出し、このプロットの分布をパターンマッチングに用いられる手法により特徴化してゆらぎを特徴量として定量化する。さらに、異なる歩行路環境下における歩行実験において現れるゆらぎの特徴量と、安定な歩行路環境である平坦路上の歩行の際に現れるゆらぎの特徴量との比較を行い、歩行路環境の安全性評価の検討を行う。

3.1 歩行軌跡のゆらぎの特徴の定量化

次に述べる手順により、歩行時の身体重心の軌跡のゆらぎ解析を進める。

(1) リカレンスプロット

リカレンスプロットとは時系列データのアトラクタ上の二点間の相対位置関係を示すことで、アトラクタの構造・性質上の周期性・非周期性や定常性・非定常性のような時間的変化を視覚的に表現する手法である。これは、 N 点の時系列データ $\mathbf{x}_i (i \in N)$ で現されるアトラクタに対して、一辺の長さがアトラクタ上の点の総数 N となる 2 次元画像 $N \times N$ を設定し、 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j (i, j \in N)$ の二点間の相対位置量として元の軌道からの変動量を表すために、次式で定義する距離 $D(i, j)$ に基づいて計算される量を画素として (i, j) に割り付けて視覚化する。

$$D(i, j) = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| \quad (1)$$

なお、2 点間距離は次式を用いて最小値を 0、最大値を 1 として正規化する。

$$D_N(i, j) = (D(i, j) - D_m) / (D_M - D_m) \quad (2)$$

ここに、 D_m 、 D_M は各々 $D(i, j)$ の最小値、最大値である。画素には、 D_N の値により画像のビット値である 0~255 を割り当て整数化し、 D_m には黒を、 D_M には白としてグレースケールを割り当てた。これによりリカレンスプロットの黒い部分は相対位置関係の強さを、そして白い部分は相対位置関係の弱さを表すことができる。

Fig.3 に正弦波の軌跡のリカレンスプロットの例を示す。Fig.3(a)の軌跡の点 1 番を基準とすると、軌跡の周期性を表す Fig.3(a)の軌跡上の点 3,5 番は Fig.3(b)のリカレンスプロットでは +45 度方向の黒い筋として現れ、同様に、軌跡の山・谷の形状の対称性を表す軌跡上の点 2,4,6 番はリカレンスプロットでは -45 度方向の黒い筋として現れ、周期性が強い場合にはリカレンスプロットには整った菱形の格子状のパターンが現れる。

(2) リカレンスプロットによるゆらぎの抽出

傾斜路における歩行実験の場合について歩行時の身体重

心の軌跡のリカレンスプロットを Fig.4 に示す。

Fig.4(a)に身体重心の軌跡における被験者の上下方向の変位を表す z 成分の変化を示す。ここに、モックアップを設置した床は進行方向にわずかに勾配があるため、身体重心の軌跡から直線として近似した勾配成分をトレンドとして除去した。また、時間軸は一步を一周期として正規化して表す。この図によると、平坦路の歩行ではほぼ規則的な運動を示すが、傾斜が大きくなるに連れて、軌跡の山と谷の形状の対称性が崩れ、また、軌跡の規則的な運動である周期性・対称性がゆらいでいる。

Fig.4(b)に身体重心の軌跡の z 成分のリカレンスプロットを示す。この図によると、平坦路では軌跡の周期性・対称性を表す+45度、-45度方向に黒い筋が鮮明に現れているが、傾斜がある場合は黒筋の交点がぼやけ、さらに傾斜が大きくなると黒筋がぼやける。これは傾斜に従い、軌跡の規則性・対称性がゆらぎ、歩行動作が正常に取れていないことを示している。この様に、身体重心の軌跡のゆらぎをリカレンスプロットにより視覚的に抽出でき、歩行路環境と身体運動の関連が把握できる。なお、以降の分析には身体重心の軌跡の z

成分を用いる。

(3) ゆらぎの特徴の定量化

各種の実験条件に応じて、身体重心の軌跡のリカレンスプロットの模様に見えるゆらぎの特徴をパターンマッチング⁴⁾に用いられるパターンの分布により特徴化して定量化する。ここでは、プロット模様の動径方向の分布 $p(r)$ 、およびプロット値の角度方向の分布 $q(\theta)$ をゆらぎの分布量として次式のように定義して、各種の歩行路環境毎にこれらのゆらぎの分布量の比較を行う。

$$p(r) = \sum_{0 \leq \theta < 360} \{1 - D_N(r, \theta)\} \quad (3)$$

$$q(\theta) = \sum_{0 \leq r < N/\sqrt{2}} \{1 - D_N(r, \theta)\} \quad (4)$$

ここに、 $D_N(r, \theta)$ はプロット値 $D_N(i, j)$ をリカレンスプロットの領域の中心を原点として極座標形式に変換したものである。また、 r はプロットの外接円の半径を最大値として 0~64 を取り、 θ は 1度刻みを取る。 $p(r)$ 、 $q(\theta)$ は各変数の分布の最小値と最大値で 0~1 へ正規化し、これらを $p_N(r)$ 、 $q_N(\theta)$ としてゆらぎの分布量の計算に用いる。

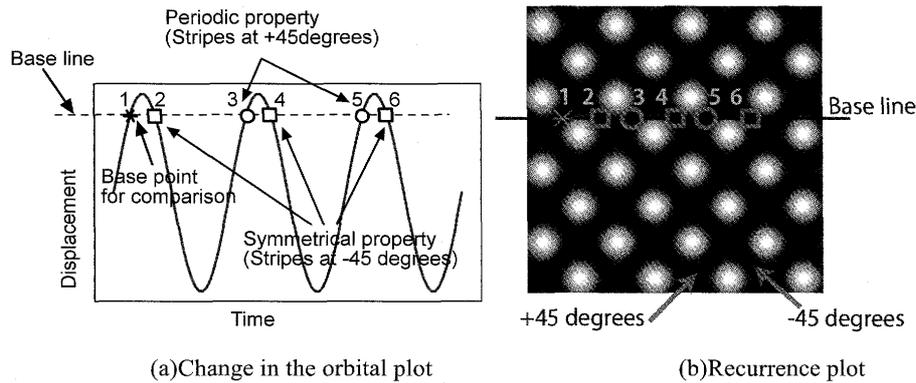


Fig.3 Orbital plot and its recurrence plot of a sinusoidal wave

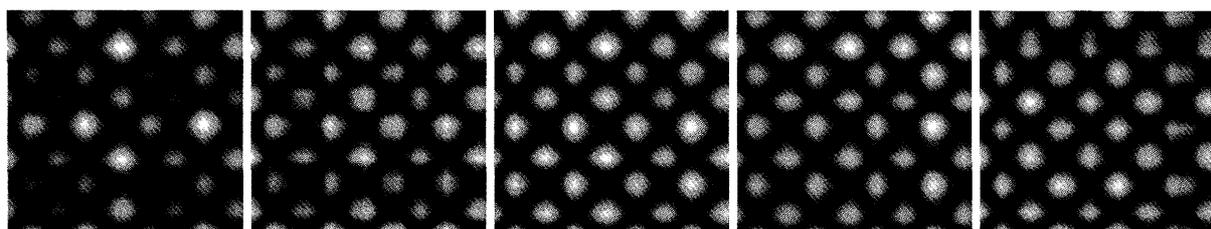
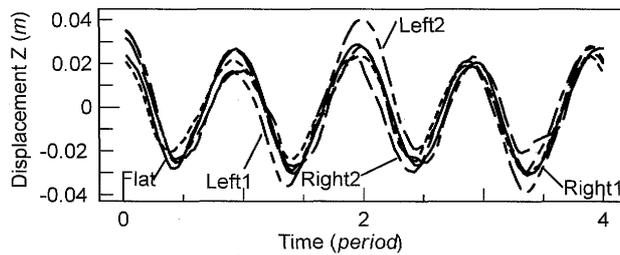


Fig.4 Change in center of gravity of human body and its recurrence plot under the experimental condition of an inclined floor for person A

(4) 異なる環境下でのゆらぎの特徴の比較

Fig.5 に平坦路と傾斜路における歩行時のゆらぎの分布量 $p_N(r)$ と $q_N(\theta)$ を比較して示す。この図によると、 $p_N(r)$ ではリカレンスプロットに内接する円の半径に相当する $r=45$ 付近にピークが現れるが、歩行路の傾斜による差はあまり現れない。一方、 $q_N(\theta)$ では、平坦路の歩行では、プロットにおける ± 45 度方向の黒筋に相当する $45, 225$ 度に卓越したピークおよび $135, 315$ 度に大きなピークが現れ、また、プロット上の黒筋同士の交点は原点を通る水平軸、垂直軸上にも存在するが、それらが $0, 90, 180, 270$ 度に比較的大きなピークとして現れる。歩行路の傾斜が増すと、対称性を表す -45 度方向の黒筋のぼやけに対応して $135, 315$ 度のピークが減少することから、ゆらぎのパターンの違いを示していることが分かる。なお、 $q_N(\theta)$ におけるピークはリカレンスプロットにおけるゆらぎの幅を表しており、ピークが鋭い場合にはゆらぎが小さく、ピークに幅がある場合にはゆらぎが大きくなり、異なる歩行路環境下でのゆらぎの現れ方の違いを表している。

(5) ゆらぎの特徴の不一致度

ゆらぎの特徴を表す分布量 $p_N(r)$ 、 $q_N(\theta)$ を比較することにより、リカレンスプロットに現れるゆらぎのパターンの違いを各種の歩行路環境下で計算する。計算では、パターンマッチングの手法において、異なるパターンの一貫度として用いられる分布間のユークリッド距離を求める。動径方向の分布の不一致度を $d(p)$ 、角度方向の分布の不一致度を $d(q)$ とすると、次式のように表される。

$$d(p) = \left\{ \sum_{0 \leq r < N/\sqrt{2}} (p_N(r) - p_{Nm}(r))^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

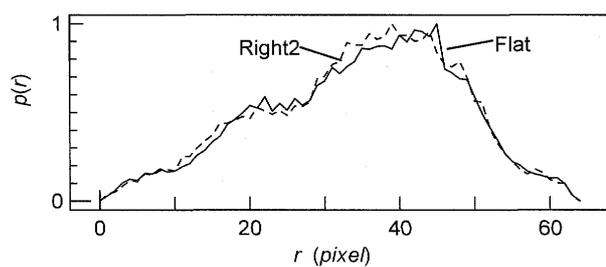
$$d(q) = \left\{ \sum_{0 \leq \theta < 360} (q_N(\theta) - q_{Nm}(\theta))^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

ここに、添え字 m は基準となるプロットの値を示し、不一致度が 0 に近いほどパターンが一致することを表す。

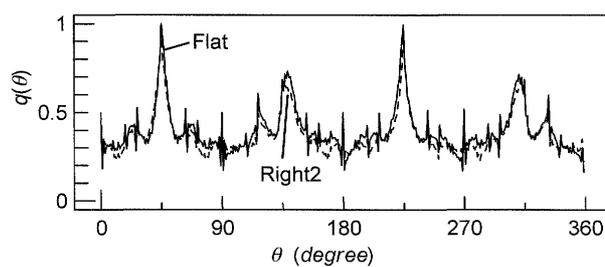
Fig.6 および Fig.7 に平坦路での歩行を基準 p_m 、 q_m に取り、傾斜路の歩行時のゆらぎの特徴の不一致度の変化を示す。これらの図によると、 $d(p)$ はリカレンスプロットの画素総数の影響を受けやすく、パターンの違いを十分に示していないが、 $d(q)$ は、床面の傾斜が増すと、リカレンスプロットにおける黒筋の交点のぼやけの広がりにつれて基準との一致度が薄れ、不一致度が増加し、ゆらぎのパターンの違いを表している。このため、ゆらぎのパターン分類の指標としては角度方向分布の不一致度が大きく現れる $d(q)$ が適している。

3.2 異なる被験者によるゆらぎの特徴

歩行路環境の変化による身体重心の軌跡のゆらぎの特徴を異なる被験者において比較した。例として歩行路環境の変化を傾斜路とした場合について、(6)式による身体重心のゆらぎの特徴の不一致度の違いを Fig.7 に示す。この図によると、ゆらぎの特徴の不一致度の変化は、被験者毎に不一致度の差はあるが、傾斜の角度に応じて概ね同様の傾向を示すため、ゆらぎの特徴の不一致度により歩行路環境を把握することが可能であることが分かった。なお、異なる被験者間に(6)式を適用した場合には、基準となる平坦路上での歩行動作に現れるゆらぎの特徴に個人差があるため、ここでは被験者毎に分析を行った。



(a)Radial distribution of the recurrence plot



(b)Rotational distribution of the recurrence plot

Fig.5 Pattern analysis of the recurrence plot under the experimental condition of an inclined floor for person A

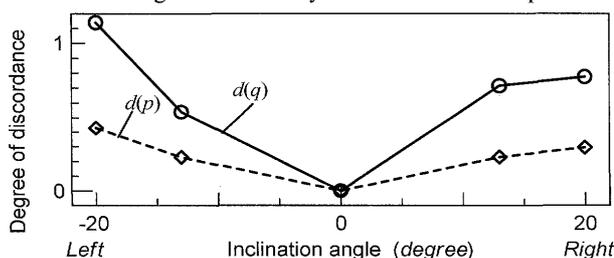


Fig.6 Discordance of the pattern of the recurrence plot under the experimental condition of an inclined floor for person A

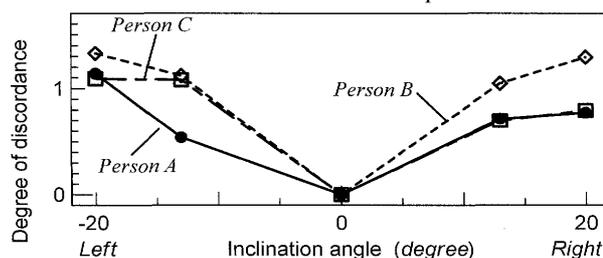


Fig.7 Discordance of pattern of inter-examinee variance under the experimental condition of an inclined floor

4. 各種の環境要因によるゆらぎ解析

歩行時の身体バランスに問題となる各種の歩行路環境要因において歩行実験を行い、身体重心の軌跡のゆらぎの特徴を抽出し、これらを平坦路上での歩行を基準とした場合のゆらぎの特徴の不一致度の比較を行った。

4.1 歩行テンポ

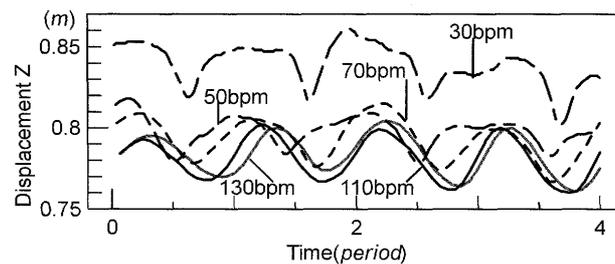
補強材を跨いで歩く際や斜面を歩行する際に現れる歩行テンポの違いを想定して、平坦路上での歩行において、メトロノームが発する一定のテンポに合わせて被験者が歩行する歩行実験を行いゆらぎ解析を行った。これを Fig.8 に示す。

Fig.8(a)に歩行実験により得られた身体重心の軌跡を示す。この図によると、テンポが早い場合は周期波に近いが、テンポが遅くなるに連れて周期波形の山が平坦に、波形の谷が狭まり、時間軸に対する対称性が失われ、また、規則性がゆらいでいる。

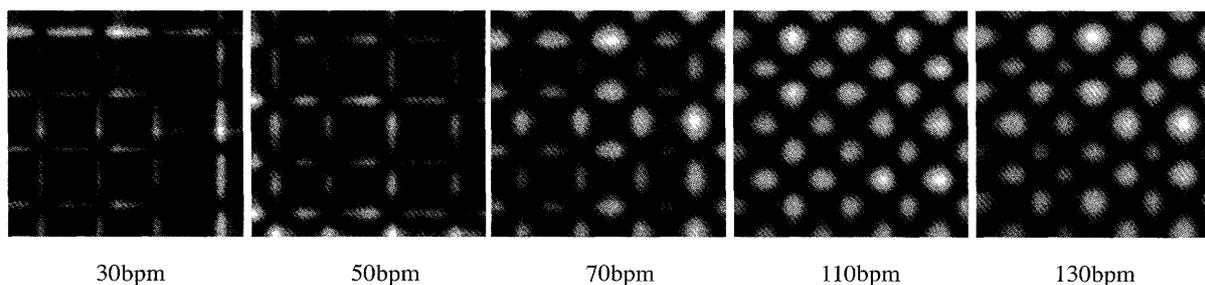
Fig.8(b)に身体重心の軌跡のリカレンスプロットを示す。この実験の被験者の平常の歩行テンポは 111~116bpm である

が、この図によると、歩行テンポが平常の歩行状態に近い 90~130bpm では±45度方向の黒い筋がはっきりしていたものが、80bpm 以下に遅くなるとプロットの黒い筋の交点ににじみが拡がり始め、さらに歩行テンポが平常の歩行状態の半分の 50bpm 以下では筋の交点を中心に黒い部分が広く拡がり、ゆらぎが現れる。これはテンポが遅くなるに連れ、身体重心の軌跡の周期波形の山が広がり、波形の谷が狭まり、時間軸に対称的な規則性が失われることを示している。

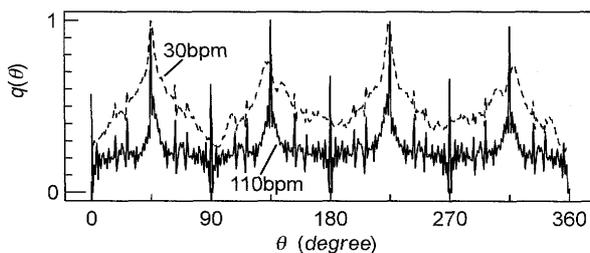
Fig.8(c)にリカレンスプロットの特徴量の角度方向分布 $q(\theta)$ を示す。図にはリカレンスプロットの違いの大きな歩行テンポ 30bpm および 110bpm の場合を示す。この図によると、平常の歩行状態に近い歩行テンポ 110bpm の場合には 45,135,225,315 度に卓越したピークが現れ、0,90,180,270 度には小さなピークが現れているのに対して、テンポが遅い 30bpm の場合にはピークの幅が広がり、ピークの差が小さくなる。これは、歩行テンポが遅くなるに連れ、プロットの黒い筋の交点に現れたにじみが拡大し、ピーク周辺の差が小さくなるためである。



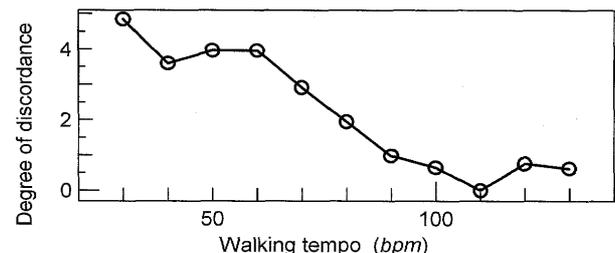
(a) Change in center of gravity of body



(b) Recurrence plot of the change in center of gravity of body



(c) Rotational distribution of the recurrence plot



(d) Discordance of pattern of the recurrence plot

Fig.8 Fluctuation analysis under the experimental condition of a walking tempo for person D

Fig.8(d)に平常の歩行テンポに近い 110bpm の歩行を基準としたゆらぎの特徴の不一致度の変化を示す。この図によると平常の歩行テンポに近い 90~130bpm ではプロットの黒い筋がはっきりしており、これらにはあまりが差がないため不一致度は小さい。これに対して、平常の歩行テンポより遅くなる 80bpm 以下では黒筋の交点のにじみの広がりに応じて不一致度が増加し、歩行テンポが極端に遅い 30bpm では黒筋の交点を中心に黒い部分が広く拡がるため不一致度はさらに増加する。このようにして、平常での歩行時に現れる身体バランスを基準とした場合に、異なる歩行路環境下での歩行時の身体バランスの状態を分析することが可能になる。

4.2 歩行路の幅

足場等の交通装置による歩行路の幅の違いを想定して、平坦路上での歩行において、進路上に一定の幅に制限した歩行路を歩行する歩行実験を行い、ゆらぎ解析を行った。これを Fig.9 に示す。

Fig.9(a)に身体重心の軌跡のリカレンスプロットを示す。この図によると、歩行路の幅が 30cm では周期波の特徴である ± 45 度方向の黒い筋がはっきりしているが、20cm に狭まると、黒い筋が縦長に伸び、また、黒筋の交点のにじみが広がるが、さらに歩行路幅が 10cm になるとこの様子が拡大し、さらに相関性の弱い白い部分が増える。

Fig.9(b)に歩行路幅 30cm の歩行を基準としたゆらぎの特徴の不一致度の変化を示す。この図によると、歩行路の幅の減少に伴い、ゆらぎが拡大し、基準との差が大きくなること

を示している。

4.3 床面の滑り状態と天井高さによる比較

歩行場所に付着したグラインダー粉や溶接ヒューム、グリス等のこぼれによる滑り状態や足場等の交通装置による天井高さの違いを想定して、平坦路上での歩行において、歩行路の床面の滑り状態を変化させた状態と床面からの天井高さを変化させた状態の歩行実験を行い、ゆらぎ解析を行った。これを Fig.10 に示す。

Table1 に示した様に滑り状態の変化については、平坦に敷かれた市販の合板の上を歩行した状態(Slip1)と摩擦係数の小さな状態に変化させるために合板上にビニールを敷き、その中に洗剤を注入した滑りやすい状態(Slip2)を作り、滑りやすい歩行路環境で歩行実験を行った。

また、天井高さの変化については、平坦な床板の上を頭部と天井が接近して首を少し傾けながら歩行する環境状態(High)から、背を少し丸めながら歩行する環境状態(Middle)、さらに、屈んで歩行する環境状態(Low)へ天井高さを変化させ、異なる天井高さの歩行路環境で歩行実験を行った。

Fig.10(a)に重心軌跡のリカレンスプロットを示す。この図によると、平坦路での通常の歩行 Slip1 では ± 45 度方向の黒筋がはっきりしているが、床が滑りやすい状態 Slip2 になるとプロットの筋の交点がにじみ、天井の高さが制約される High, Middle でもプロットの筋の交点がぼやけ、さらに屈んで歩行する Low になるとプロットの筋の交点が消滅する。

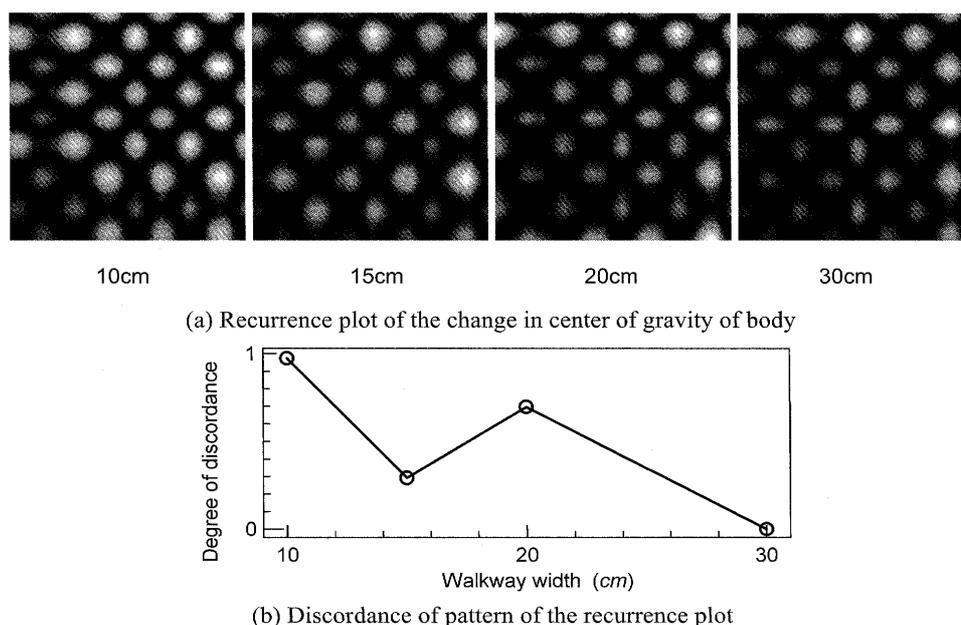


Fig.9 Fluctuation analysis under the experimental condition of a walkway width for person D

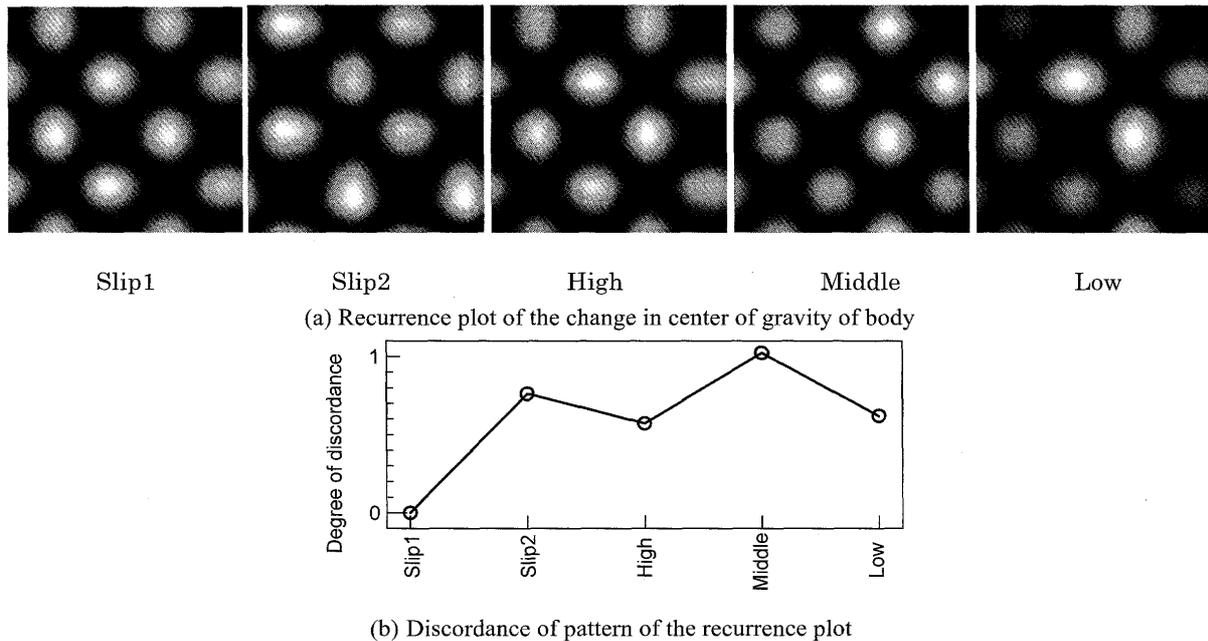


Fig.10 Fluctuation analysis under the experimental condition of a slippery floor and a controlled ceiling height for person E

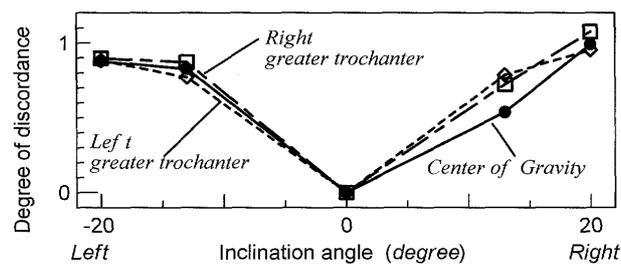


Fig.11 Discordance of pattern of the inter-body segment variance under the experimental condition of an inclined floor

Fig.10(b)に平常時の歩行に相当する Slip1 での歩行状態を基準として、他の歩行路環境での歩行状態のゆらぎの特徴の不一致度の変化を示す。この図によると、床が滑りやすい状態になるとリカレンスプロットの筋の交点のにじみによるパターンの違いから不一致度が大きくなる。また、歩行時に天井の高さの制約がある場合においても、リカレンスプロットの黒筋の交点のぼやけや黒筋の消失につれて、不一致度が拡大する。この場合においても、平常での歩行時に現れる身体バランスを基準とした場合に、異なる歩行路環境下での歩行時の身体バランスの状態を分析することが可能であることが分かった。

4.4 不一致度による歩行路環境の安全性評価の検討

ゆらぎの特徴の不一致度を用いることにより、平常での歩行時に現れる身体バランスを基準とした場合に、異なる歩行路環境下での歩行時の身体バランスの状態を分析することが可能であることから、ゆらぎの特徴の不一致度による歩行路環境の安全性評価の検討を行った。

傾斜のある歩行路環境では、Right1,Left1 になると歩行に支障が現れるとの被験者による印象を得た。また、歩行テン

ポについては通常の歩行より遅い 80bpm 以下になると歩行動作につまづきの動作があるとの印象を得た。さらにスリップ状態では通常の状態からわずかな滑りでも歩行に支障があるとの印象を得、天井高さでは自身の身長よりもわずかに低い状態でも足を引きずる歩行になるため躓きやすくなり歩行しづらいとの印象を得た。これらを総合すると、不一致度が概ね 0.7 を超えた歩行路環境において歩行動作を行った場合に身体バランスに支障が現れる可能性があることが分かった。

4.5 身体バランスの簡易推定の検討

身体重心の軌跡を得るには身体各部位の 3 次元位置を取得し身体部分係数を用いて被験者の身体重心位置を推定するが、3 次元位置情報の取得には膨大な手間を必要とする。このため、今後の種々の歩行路環境下での歩行動作の解析を簡便化する際の検討として、身体重心に代わりに身体バランスを代表する他の身体部位について同様のゆらぎ解析を行い、簡易推定法の検討を行った。Fig.11 に傾斜路における歩行実験においてゆらぎ解析を行った例を示す。検討によると、身体重心の近くに位置する左右の大腿骨の外側の出張り

ある大転子の軌跡におけるゆらぎ解析においても、身体重心におけるゆらぎ解析とほぼ一致することが分かり、大転子の軌跡を用いることにより身体バランスの解析が可能であることが分かった。

5. 結言

カオス解析の手法であるリカレンスプロットを適用したゆらぎ解析法の提案を行い、この解析法を用いて種々の歩行路環境の下での歩行に現れる身体バランスのゆらぎを解析することにより、歩行路環境と身体バランスの関連性を把握できることを確認した。また、安定な歩行状態での身体バランスと、不安定な歩行状態を引き起こす歩行路環境下での身体バランスについて、ゆらぎの不一致度によりゆらぎの違いを定量化した。さらに、ゆらぎの不一致度を異なる歩行路環境下での歩行状態において検討を行い、歩行路環境の安全性評価の検討を行った。

謝 辞

なお、本研究の一部は科学研究費(基盤研究(B) 20360396)の助成を受け、遂行されたものである。

参 考 文 献

- 1) 篠田岳思, 池田耕平, 合戸崇司, 田中太氏: 造船所における歩行安全評価のためのヒューマンモデルに関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第6号, 2007, pp.83-89
- 2) 田中太氏, 篠田岳思: 造船所における労働安全性評価のためのカオス解析の適用に関する研究(その3) ゆらぎ解

析による歩行環境評価への適用, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第7W号, 2008, pp.81-84.

- 3) 例えば, 合原一幸編, カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書, 2000
- 4) 例えば, 酒井幸市, 画像処理とパターン認識入門, 森北出版, 2006

付録 DLT法による2次元画像上の3次元座標の計測

ビデオ撮影で得られる2次元ビデオ画像データにおける2次元座標を (U, V) とし, 求める3次元座標を (X, Y, Z) とし, カメラに依存するカメラ定数を $L_1 \sim L_{11}$ とすると次の関係式が成り立つ (Fig.1(c)参照)。

$$L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - L_9XU - L_{10}YU - L_{11}ZU = U \quad (7)$$

$$L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8 - L_9XU - L_{10}YU - L_{11}ZU = V \quad (8)$$

これらの式より, 初めにカメラ定数 $L_1 \sim L_{11}$ を計算するが, これには(7)および(8)式に6カ所以上のコントロールポイントについて予め計測してある既知の3次元座標位置および画面上2次元座標の数値を代入して連立方程式をたてて $L_1 \sim L_{11}$ を未知数として解くことにより求める。次に $L_1 \sim L_{11}$ が求まると, 2台以上のカメラから得られる画像データ (U, V) を用いて先の(7)および(8)式を用いて連立方程式を立てることにより画面に対応する空間上の3次元位置座標が求まる。なお, 連立方程式では方程式の方が未知数の数より多い過剰な条件となるため, 最小二乗法により計算する。なお, ここではDLT法のソフトウェアとしてFrame-DIAS (DKH社製)を用い, また位置精度向上のためにコントロールポイントは歩行域の周囲に90点設定して, これらの位置の3次元座標の取得にレーザー測量器(PENTAX社製R-316c)を用いた。