

卒業論文要旨

支持面一定周波数揺動に対する立位バランス応答の定常性評価

Evaluation of the steady-state response during standing on support surface swaying at a constant frequency

システム工学群

動的デザイン研究室 1230098 田中 創

1. 緒言

人のバランス評価は、一般的に安静立位時の摂動で評価される。一方、歩行の安定性を評価する場合は、周期的な応答の安定性を調べる必要がある。その理由として、歩行では平衡状態の維持ではなく、周期運動の継続を制御目標とするためである。

周期運動の安定性を評価する手法として、局所動的安定性 (Local dynamic stability: LDS) に基づく方法が提案されている⁽¹⁾。この方法では、特性指数 λ_{Max} が正であれば不安定であり、負であれば安定である。歩行中は周期運動を維持しているため、 λ_{Max} は負の値を示すはずであるが、実際の歩行運動にLDSを適用すると λ_{Max} は正の値となる⁽²⁾⁽³⁾。これは歩行が不安定であることを意味するが、実際の歩行は継続しているため、 λ_{Max} は負を示すことが望ましい。これを実現するためには、任意のタイミングで外乱を与え、定常応答への回帰を評価する方法が考えられる。

本研究の解析対象は、一定周波数で前後に揺動する支持面上に立つ人間の定常的なバランス応答とする。支持面に外乱を加えることでゆらぎを生じさせ、その定常応答解への収束性をLDSで評価する。計画的に外乱を与えることで、定常応答解へ収束するタイミングを明確にし、定めた区間の特性指数を評価する。このときの特性指数は、負となることが期待される。

2. 局所的な動的安定性評価法

2.1 状態空間の構成

ここでは、計測信号 $x(t)$ の周期的安定性を評価する。LDSでは、一般的に以下のように遅延時間を活用した n 次元の状態空間 $Y(t)$ を構成する。

$$Y(t)=[x(t), x(t+T_d), x(t+2T_d), \dots, x(t+(n-1)T_d)] \quad (1)$$

ここに、 T_d は定められた遅延時間である。状態空間の次元と遅延時間に関しては、明確な決定法が存在しない。

本研究では人の質量中心 (center of mass: COM) の支持面からの相対変位を計測信号 $x_b(t)$ とし、先行研究に従って遅延時間を揺動周期の10%、状態空間を5次元に設定して状態空間 $Y_d(t)$ を構成する。

$$Y_d(t)=[x_b(t), x_b(t+T_d), x_b(t+2T_d), x_b(t+3T_d), x_b(t+4T_d)] \quad (2)$$

式(2)のうち、 $x_b(t), x_b(t+T_d), x_b(t+2T_d)$ の3次元状態空間をプロットすると、図1(A)のようなサイクル状の軌跡を示す。ここでは評価対象が質量中心変位であるため、1サイクルの軌跡の中心がゆっくりと移動し、LDSの適用を難しくしている。このような挙動は無視する必要があるため、計測データから、前後1周期分のデータを平均したものを引くことで軌跡の中心を固定する。本研究では、この操作を標準化と呼ぶ。

$$\overline{Y}_d(k) = Y_d(k) - \frac{\sum_{i=-n_r/2}^{n_r/2-1} Y_d(k+i)}{n_r} \quad (3)$$

ここに、 k はデータ番号、 n_r は揺動1周期分のデータ数である。標準化した軌跡を図1(B)に示す。

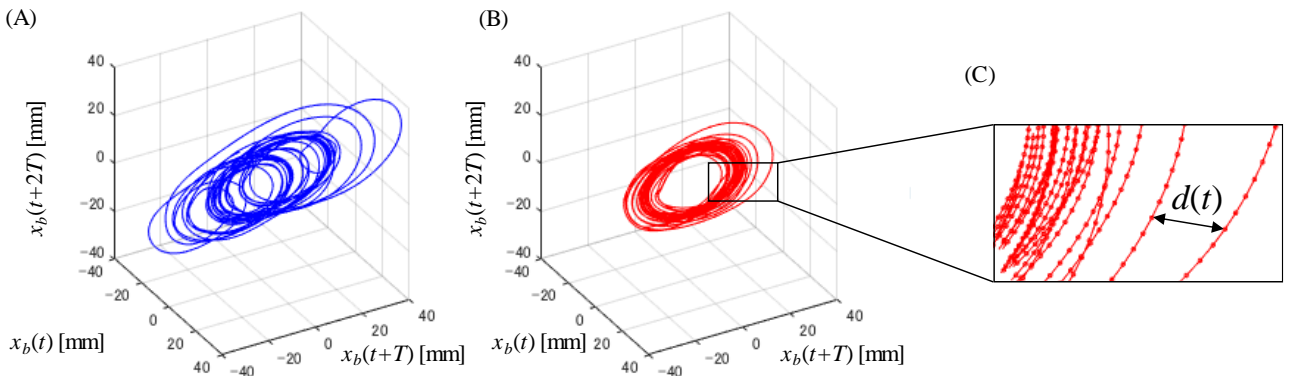


Fig. 1 Constructed state-space of the COM trajectory with three dimensions. (A) without standardization. (B) with standardization. (C) Euclidean norm to a point one cycle ahead.

2.2 特性指数の導出

特性指数 λ_{Max} を導出するために、状態空間 Y_d に対して揺動の1周期先までのユークリッドノルム $d(t)$ を以下のように定義する(図1(C)を参照)。

$$d(t) = \|Y_d(t) - Y_d(t+T)\| \quad (4)$$

$d(t)$ と λ_{Max} の関係は以下のように定義する。

$$\lambda_{Max} = \frac{\ln\{d(t)\} - \ln\{d(t_0)\}}{t - t_0} \quad (t_0 < t \leq t_0 + \Delta t) \quad (5)$$

本研究ではバランスを崩してからおよそ揺動2周期程度で定常運動に収束すると考え、 Δt は2周期分の時間とした。また、 t_0 は式(5)において外乱を加えてから2周期以内で $\ln\{d(t)\}$ が最も大きくなる時間とした。 λ_{Max} は、式(5)より $\ln\{d(t)\}$ に対する線形近似直線の傾きを最小二乗法で導出した。

3. 一定周波数揺動実験

3.1 実験の概要

被験者を健常な20代男性3名とする。被験者には、揺動試験機上に素足で立ち、視線を前方にして両腕を自然に下ろすように指示した。

実験の概略図を図3に示す。揺動試験機として、前後に支持面の揺動が可能なテック技販製BASYSを使用し、周波数0.69 Hz、変位振幅25 mmの揺動を40周期与えた。支持面の揺動波形を図4に示す。最初と最後の5周期を除く30周期を解析区間とした。揺動開始後15.75周期と20.25周期に被験者のバランスを崩すための外乱を加えた。同じ実験を5回繰り返して実施した。

被験者の質量中心は、フォースプレート(テック技販製TF-3040)と慣性センサ(テック技販製IMS-WT)の計測に基づいて推定する⁽⁴⁾。サンプリング周波数はともに100 Hzとした。

3.2 実験結果

被験者3人分(A,B,C)の実験における特性指数 λ_{Max} を表1に示す。従来の歩行実験とは異なり、 λ_{Max} はすべて負になり安定を示した。一方、個々の外乱に対する特性指数のばらつきが大きいので、個人の周期的な運動の安定性を調べるためには工夫が必要と考えられる。

4. 結言

本研究では、一定周波数での支持面揺動に対して外乱を付加し、定常応答解への回帰を局所動的安定性の評価法に基づいて調べた。特性指数 λ_{Max} はすべて負を示したので、周期運動の安定性の正確な評価に近づいたと思われるが、ばらつきが大きいので、計測方法や解析法に工夫の余地がある。本手法を発展させることで、人の歩行の安定性をより正確に評価することを目指す。

文献

- (1) Rosenstein M.T., Collins J.J., Deluca C.J., "A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets", *Nonlinear Phenomena, Physica D*, Vol. 65, No. 1-2 (1993), pp. 117-134.
- (2) Dingwell J.B., Marin L.C., "Kinematic variability and local dynamic stability of upper body motions when walking at different speeds", *Journal of Biomechanics*, Vol. 39, No. 39 (2006), pp. 444-452.

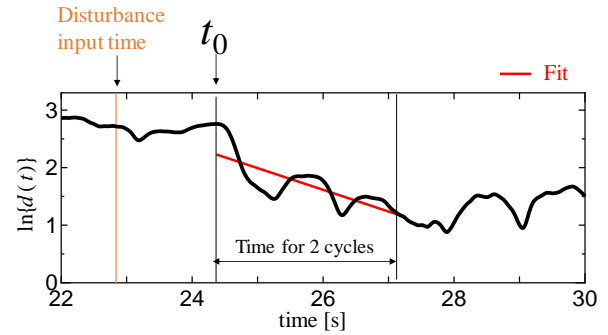


Fig. 2 The series graph of $\ln\{d(t)\}$ defined as Eq. (4). The left end. Orange line shows a timing when the disturbance is added. Red line shows a fitted straight line by the least-squares method. The slope of the line means λ_{Max} . The peak within 2 cycles of input is designated as t_0 . 3 cycles from t_0 are fitted.

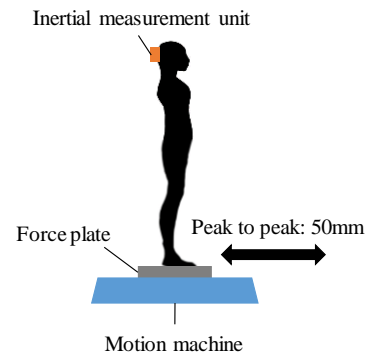


Fig. 3 Schematic diagram of the constant frequency sway test.

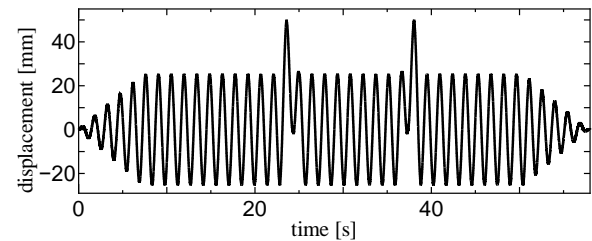


Fig. 4 Waveform of sagittal displacement of the support surface.

Table 1 The characteristic exponents of a three subjects (A, B, C) in the test.

subject	λ_{Max}
A	-0.390 ± 0.207
B	-0.421 ± 0.219
C	-0.376 ± 0.258

- (3) England S.A., Granata K.P., "The influence of gait speed on local dynamic stability of walking", *Gait & Posture*, Vol. 25, No. 2 (2007), pp. 172-178.
- (4) 園部元康, 井上喜雄, "フォースプレート計測に基づく立位時の矢状面質量中心推定", *日本機械学会論文集*, Vol. 85, No. 877 (2019).