4脚歩行ロボットの最適歩行パターン

土屋和雄 ○川上学 辻田勝吉 (京都大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻)

Optimal Gait of Quadruped Locomotion Robot

Kazuo Tsuchiya, ○ Manabu Kawakami, Katsuyoshi Tsujita
(Dept. of Aeronautics and Astronautics, Graduate School of Engineering, Kyoto University)

Abstract: We study the optimal gait of a quadruped locomotion robot. Appropriate periodic motion of each leg is given, and we formulate optimization problem of this robot, where the optimization variables are the difference of phase angles between legs. This optimization is executed as objective function is control energy.

1 まえがき

Hoyt と Taylor[1] は小馬を対象として歩行運動の生理実験を行い、次の結果を得た。
1. 小馬の歩行パターンをウォーク、トロット、ギャロップに拘束し、歩行速度を制御して消費酸素量を計測した。その結果、各歩行パターンはそれぞれ最小の酸素消費量の歩行速度があること、また、それぞれの最小酸素消費量はほぼ等しいことが明らかとなった。
2. 小馬の歩行パターンを無拘束にして、歩行速度を制御し、歩行パターンの出現頻度を観察した。その結果、それぞれの歩行パターンは最小酸素消費量に対応する歩行速度において、その出現頻度が最大となった。
これらの実験結果は、次のように解釈できる。すなわち、小馬は環境変化 (歩行速度) に対応して、最適な歩行パターンを形成し歩行している。現在、環境変化 (歩行速度) に適応して、その歩行パターンを変化させ、安定な歩行を実現する脚歩行ロボットの歩行制御則の研究が行われている [2]。我々は、すでに4脚歩行ロボットの歩行制御系を提案している。この歩行制御系は、パターン制御系と脚制御系から構成される。パターン制御系は、各脚に対応する振動子から構成され、脚制御系は、各脚のジョイントの駆動系から構成される。脚制御系は、振動子の位相の関数として、与えられた脚軌道にそってジョイントを駆動し、パターン制御系は、歩行状態のフィードバック信号に基づき、各振動子間の位相差を調整し、環境に適応した歩行パターンを形成する。本論文では、この歩行制御系において適当な目的関数を設定し、振動子間の位相差を最適化問題の解として求め、得られる最適歩行パターンについて、検討を行う。

2 力学モデル

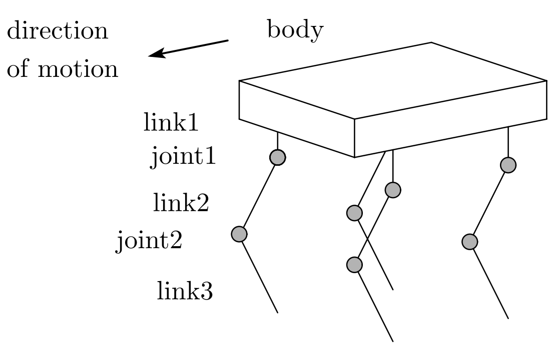

Fig. 1 quadruped locomotion robot

Fig.1 に示す4脚歩行ロボットの力学モデルを対象とする。このロボットは、胴体と脚から構成され、脚は3つのリンクから成る。また、胴体とリンク1は剛体的に結合され、リンク1とリンク2、リンク2とリンク3は1自由度のジョイントで結合されている。慣性空間に固定された単位ベクトル座標系を $[\boldsymbol{a}^{(-1)}]=[\boldsymbol{a}_1^{(-1)},\boldsymbol{a}_2^{(-1)},\boldsymbol{a}_3^{(-1)}]$、胴体に固定された単位ベクトル座標系を $[\boldsymbol{a}^{(0)}]=[\boldsymbol{a}_1^{(0)},\boldsymbol{a}_2^{(0)},\boldsymbol{a}_3^{(0)}]$ とする。ただし、進行方向に対して、ロール方向を1軸方向、ピッチ方向を2軸方向、ヨー方向を3軸方向とする。Fig.1 において、ロボットの脚は進行方向に向かって左前を脚1、右前を脚2、左後を脚3、右後を脚4と名付ける。それぞれの脚のリンクとジョイントも、図のように番号付ける。$[\boldsymbol{a}^{(-1)}]$ 系の原点から $[\boldsymbol{a}^{(0)}]$ 系の原点までの距離ベクトルを $\boldsymbol{r}^{(0)}=[\boldsymbol{a}^{(0)}]r^{(0)}$ と定義する。$[\boldsymbol{a}^{(-1)}]$ 系に対する $[\boldsymbol{a}^{(0)}]$ 系の回転をオイラー角 $\theta^{(0)}$ を用いて表す。また、脚 i リンク $(j+1)$ のジョイント j の角度を $\theta_j^{(i)}$ とする。

状態変数 q を次のように定義する。

$$q=[r_m^{(0)},\theta_m^{(0)},\theta_{jm}^{(i)}] \tag{1}$$
$$(i=1,\cdots,4;\ j=1,2;\ m=1,2,3)$$

状態変数 q に対するラグランジュの運動方程式より、次の運動方程式が得られる。

$$M\ddot{q}+H(q,\dot{q})=G+\sum\tau_j^{(i)}+\Lambda \tag{2}$$

ここで、M は一般化慣性行列、$H(q,\dot{q})$ はコリオリの力や遠心力を含む非線形項、G は重力項、$\tau_j^{(i)}$ は脚 i のジョイント j まわりに加えられたトルク、Λ は床から脚先に加えられる反力である。脚先と床との相互作用は、脚先接地点を平衡点とするバネ・ダンパーを介して脚先が床に接触しているとモデル化する。

3 歩行制御系

制御系は、脚制御系と歩行パターン制御系から構成される (Fig.2)。脚制御系は、歩行パターン制御系から与えられる軌道運動を実現するように、脚のジョイントのアクチュエータを動かす。歩行パターン制御系は、各脚に配置された振動子から構成される。そして、基準となる歩行パターンの指令値を基にして、歩行パターンを構成し脚制御系へ指令信号を送る。

4 歩行計画

歩行計画は、各脚の周期軌道を各振動子の位相の関数として設計する軌道計画と、各脚の振動子間の位相を決定する歩行パターン計画から成る。

4.1 軌道計画

脚先の周期軌道を設計する。脚先の位置が遊脚相から支持脚相へ移る点を着地点 (AEP)、支持脚相から遊脚相へ移る点を離脱点 (PEP) と定義する。基準となる AEP,PEP を座標系 $[\boldsymbol{a}^{(0)}]$ において $\hat{\eta}_A^{(i)},\hat{\eta}_P^{(i)}$ と表す。遊脚相の基準軌道は点 $\hat{\eta}_P^{(i)}$ と点 $\hat{\eta}_A^{(i)}$ を結ぶ閉曲線 $\hat{\eta}_{Sw}^{(i)}$ で与えられ、支持脚相の基準軌道は点 $\hat{\eta}_A^{(i)}$ と点 $\hat{\eta}_P^{(i)}$ を結ぶ直線 $\hat{\eta}_{Sp}^{(i)}$ で与えられる。

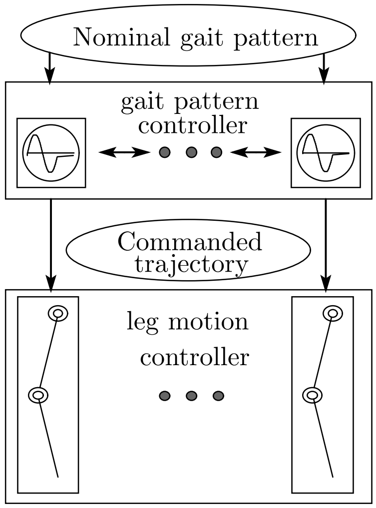

Fig. 2 control system

これらの軌道を振動子の位相の関数として与える。すなわち、脚 i に配置する振動子 i を次のように設定する。

$$z^{(i)} = \exp(\boldsymbol{j}\phi^{(i)}) \tag{3}$$

ここで、$z^{(i)}$,$\phi^{(i)}$ は振動子の状態と位相を表す。

AEP と PEP での振動子 i の基準位相 $\phi^{(i)}$ を次のように設定する。

$$\widehat{\phi}^{(i)} = \widehat{\phi}_A^{(i)}\ at\ AEP,\ \ \widehat{\phi}^{(i)} = 0\ at\ PEP \tag{4}$$

基準軌道 $\widehat{\eta}_{Sw}^{(i)}$ と $\widehat{\eta}_{Sp}^{(i)}$ は振動子の基準位相 $\widehat{\phi}^{(i)}$ の関数であり、それぞれ次のように与えられる。

$$\widehat{\eta}_{Sw}^{(i)} = \widehat{\eta}_{Sw}^{(i)}(\widehat{\phi}^{(i)}) \tag{5}$$
$$\widehat{\eta}_{Sp}^{(i)} = \widehat{\eta}_{Sp}^{(i)}(\widehat{\phi}^{(i)}) \tag{6}$$

脚先の基準軌道 $\widehat{\eta}^{(i)}$ はこれらの 2 つの軌道を切り替えることで次のように与えられる (Fig.3)。

$$\widehat{\eta}^{(i)}(\widehat{\phi}^{(i)}) = \begin{cases} \widehat{\eta}_{Sw}^{(i)} & (0 \le \widehat{\phi}^{(i)} < \widehat{\phi}_A) \\ \widehat{\eta}_{Sp}^{(i)} & (\widehat{\phi}_A \le \widehat{\phi}^{(i)} < 2\pi) \end{cases} \tag{7}$$

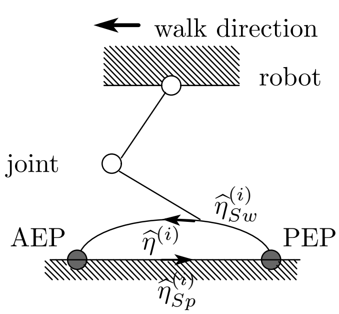

Fig. 3 trajectory of leg tip

各脚の振動子の周期と支持脚相の基準時間との比率を次の基準デューティー比 $\widehat{\beta}^{(i)}$ で表す。

$$\widehat{\beta}^{(i)} = 1 - \frac{\widehat{\phi}_A^{(i)}}{2\pi} \tag{8}$$

このとき、各脚の基準歩幅 $\widehat{S}^{(i)}$ と基準歩行速度 $\widehat{v}$ は次式で与えられる。ここで、$\widehat{T}_w$ は歩行周期である。

$$\widehat{S}^{(i)} = \widehat{\eta}_{A1}^{(i)} - \widehat{\eta}_{P1}^{(i)},\ \ \widehat{v} = \frac{\widehat{S}^{(i)}}{\widehat{\beta}^{(i)}\widehat{T}_w} \tag{9}$$

4.2 歩行パターン計画

歩行パターン計画は、最適化問題として定式化し設計する。決定変数は、各脚の振動子間の位相差とし、目的関数は単位進行距離当たりの制御エネルギーとする。最適化手法は、パウエルの共役勾配法とシミュレーティッドアニーリング法を用いる。

4.2.1 最適化問題

決定変数を次のように設定する。

$$c^{(i)} = \phi^{(i)} - \phi^{(4)}\ (i = 1, 2, 3) \tag{10}$$

目的関数 U を次のように設定する。

$$U(c^{(i)}) = \frac{\int_{t=t_m}^{t=t_m+T} \sum_{i,j} (\tau_j^{(i)})^2 dt}{\Delta r_1^{(0)}} \tag{11}$$

$$\Delta r_1^{(0)} = r_1^{(0)}(t_m + T) - r_1^{(0)}(t_m)$$

t_m : 定常歩行になった時刻

T : 性能評価時間

また、最適化の各段階において、運動方程式 (2) のシミュレーションを行う。その初期条件としては、ロボットは出発点で静止し脚 4 の振動子の位相 $\phi^{(4)}$ は 0 とする。

4.2.2 パウエルの共役勾配法

1. n 個の独立な方向ベクトル $d_0, \cdots, d_{n-1}$ と初期値 c_0 を指定する。
2. $i = 0, \cdots, n-1$ について、$U(c_i + \lambda d_i)$ が最小になるような $\lambda = \lambda_i$ を求め、次のように c_{i+1} を定める。

$$c_{i+1} = c_i + \lambda_i d_i \quad (i = 0, \cdots, n-1) \tag{12}$$

3. $i = 0, \cdots, n-1$ について、$U(c_i) - U(c_{i+1})$ が最大になるような $i = m$ を求め、$\Delta = U(c_m) - U(c_{m+1})$ とおく。
4. $U_1 = U(c_0), U_2 = U(c_n)$ と定め、$U_3 = U(2c_n - c_0)$ を計算する。
5.

$$U_3 \ge U_1 \tag{13}$$
$$2(U_1 - 2U_2 + U_3)(U_1 - U_2 - \Delta)^2 \ge \Delta(U_1 - U_3)^2 \tag{14}$$

式 (13),(14) のどちらかが成立する場合は、次の更新を行い、方向ベクトル $d_0, \cdots, d_{n-1}$ は変更しない。

$$c_0 := c_n \tag{15}$$

また、式 (13),(14) のどちらも成立しない場合は、$d_n = c_n - c_0$ として $U(c_n + \lambda d_n)$ が最小になるような $\lambda = \lambda_n$ を求め、次の更新を行い、方向ベクトルは、$d_0, \cdots, d_{m-1}, d_{m+1}, \cdots, d_{n-1}, d_n$ を用いる。

$$c_0 := c_{n+1} = c_n + \lambda_n d_n \tag{16}$$

6. 操作 2 から操作 5 を繰り返し、次の条件が満たされるならば終了する。ϵ は微小量である。

$$|U(c_0) - U(c_n)| \le \epsilon \tag{17}$$

また、操作 2, 操作 5 における 1 次元の最適化では、3 点とその点における関数値を用いた 2 次関数による内挿により、極小点を推定した。

4.2.3　シミュレーティッドアニーリング法

1. ロボットを制御則 c に従い歩行させる。目的関数 U を測定する。

2. アニーリング時間 t_a より、温度 Θ の値を決定する。

$$\Theta = \Theta(t_a) \tag{18}$$

3. 制御則の変化 Ma に従い、制御則 c を変化させる。制御則変化速度 v は、温度 Θ を用いた次の分布 $Pr(v)$ を成す。

$$Ma : \Delta c = v \Delta t_a \tag{19}$$
$$c' = c + \Delta c$$
$$Pr(v_i) = \left(\frac{m}{2\pi k \Theta}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{m v_i^2}{2k\Theta}\right)$$

4. ロボットを制御則 c' に従い歩行させる。目的関数 U' を測定する。
5. 状態遷移則 Me に従い、制御則 c、目的関数 U を更新する。状態遷移する確率を Pr、また $\Delta U = U' - U$ とする。

$$Me : Pr = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\Delta U}{k\Theta}\right) & (\Delta U > 0) \\ 1 & (\Delta U \le 0) \end{cases} \tag{20}$$

状態遷移する場合

$$c := c' = c + \Delta c, \quad U := U' = U + \Delta U \tag{21}$$

状態遷移しない場合

$$c := c, \quad U := U \tag{22}$$

6. アニーリング時間 t_a の更新をする。

$$t_a := t_a + \Delta t_a \tag{23}$$

7. 操作 2 から操作 6 を繰り返し、アニーリング時間 t_a が終了アニーリング時刻になれば、終了する。次の 2 つの条件が共に成立しなければ、操作 1 に戻って、アニーリングを繰り返す。

$$U(c(t_{a,\max})) \le U_0 \tag{24}$$
$$\left|\frac{1}{N}\left(\sum \Delta U\right)\right|$$
$$= \frac{1}{N}\left|U(c(t_{a,\max} - N\Delta t_a)) - U(c(t_{a,\max}))\right|$$
$$\le \epsilon\, k\Theta(t_{a,\max}) \tag{25}$$

N は適当なステップ数 (整数)、U_0 は適当な目的関数値、ϵ は微小量である。

5　数値計算例

body	length	33.8 $[cm]$
	width	20.0 $[cm]$
	mass	2.03 $[kg]$
link1	height	2.6 $[cm]$
	mass	0.32 $[kg]$
link2	height	18.8 $[cm]$
	mass	0.918 $[kg]$
link3	height	19.3 $[cm]$
	mass	0.595 $[kg]$

Table.1 values of system parameters

対象とした 4 脚歩行ロボットの仕様を Table.1 に記した。

シミュレーションの離散時間は $\Delta t = 1.0[ms]$ であり、歩行周期は $\widehat{T}_w = 0.80[s]$、脚制御系の周波数は $10[Hz]$(遊脚相), $8[Hz]$(支持脚相)、また、床モデルの周波数は $20[Hz]$ である。4 脚歩行の典型的な歩行パターンを Fig.4 にまとめる。

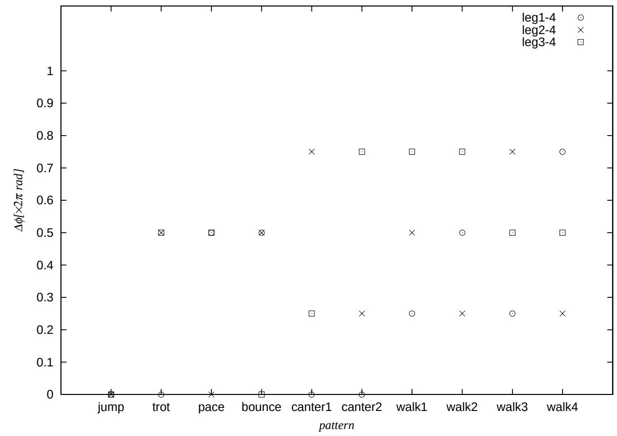

Fig. 4 the phase angle of typical gait

パウエルの共役勾配法においては、位相差の初期設定値として、Fig.4 に示される $trot, pace, bounce$, $walk1, \cdots$, $walk4$ の 7 種類の典型的歩行パターンを用いた。シミュレーティッドアニーリング法においては、試行回数を 50 回 $(= \frac{t_{a,\max} - t_{a,\min}}{\Delta t_a})$ と定め、デューティー比 β を $\Delta\beta = 0.02$ とし、$\beta = 0.80$ から $\beta = 0.50$ へと下げていく場合について、最適化を行った。$\beta = 0.80$ のとき、最適化のアニーリングステップにおける初期位相差は典型的な $jump$ 歩行パターンとした。各 β にて最適化により得られた位相差は、次の β における最適化のアニーリングステップの初期値に用いた。パウエルの共役勾配法とシミュレーティッドアニーリング法によって求められた結果を、Fig.5 に示す。また、シミュレーティッドアニーリング法によって得られた位相角を Fig.6 に示す。シミュレーティッドアニーリング法の結果から大域的最適歩行パターンは、デューティー比 β に対してほぼ等しい目的関数の値をもつことがわかる。一方、パウエルの共役勾配法の結果からデューティー比 β に対して、数多くの局所最適な歩行パターンが存在すること、また、大域的最適歩行パターンとほぼ等しい目的関数の値をもつ歩行パターンが複数存在することがわかる。図中、局所最適解を与える歩行パターンを典型的歩行パターンとの相関関数 D の近いもので分類し表している。

ここで、歩行パターン m における各脚同士の相関 W_{ij} を次のように定めた。

$$W_{ij}^{(m)} = \cos(\phi^{(i)} - \phi^{(j)}) \in [-1 : +1] \tag{26}$$

歩行パターン m と n の相関関数 D を次式のように定める。

$$\begin{aligned} D &= \mathrm{Cor}\,(W^{(m)}, W^{(n)}) \\ &= \frac{\mathrm{tr}\,(W^{(m)T} W^{(n)})}{(\mathrm{tr}\,(W^{(m)T} W^{(m)})\,\mathrm{tr}\,(W^{(n)T} W^{(n)}))^{\frac{1}{2}}} \\ &\in [-1 : +1] \end{aligned}$$

ただし、式 (26) より、典型的な歩行パターン $walk3, walk4$ と $canter1$, $canter2$ は任意の歩行パターンに対しそれぞれ同じ相関関数の値 D を与える。

シミュレーティッドアニーリング法によって得られた歩行パターンと典型的な歩行パターン (Fig.4) との相関 D を Fig.7 に、そして、各デューティー比 β において歩行パターンを典型的な歩行パターンに固定した場合の目的関数 U を Fig.8 に記した。

歩行パターンは β の全域に渡って $trot$ に近い (Fig.7)。ただし、$\beta = 0.80$ においてはアニーリングの初期値として $jump$ 歩行パターンを与えたため、最適化された歩行パターンは $jump$ 歩行パターンとの相関が強い。また、$walk1$ は $\beta = 0.70$ において、$walk4$ は $\beta = 0.68, 0.54, 0.52$ において、$canter2$ は $\beta = 0.54, 0.52$ において、最適化された歩行パターンとの相関がそれぞれ高くなっている。$walk2, bounce, pace$ は、いずれも、β の全域に渡って最適化された歩行パターンとの相関が低い。典型的な $trot, walk4$ 歩行パターンは最適化されたものと目的関数の値は同程度に低いが、$trot$ は β の小さいところで、$walk4$ は β の大きいところで目的関数値がそれぞれ

大きくなる。これは、歩行パターンを固定したとき、目的関数が必ずしもデューティー比 β の滑らかな関数ではないことを示している。

6 結論

以上の解析結果から、対象とする４脚歩行ロボットは与えられた目的関数のもと次のような歩行特性をもつ。

1. 各デューティー比 β(歩行速度) において、局所的に最適な歩行パターンは多数存在する。また、ほぼ大域的に最適な歩行パターンは複数存在する。大域的に最適な歩行パターンの目的関数の値はデューティー比 β(歩行速度) の広い範囲でほぼ一定である。

2. 歩行パターンを一定にして、デューティー比 β(歩行速度) を変化させたとき、いくつかの歩行パターンは広い範囲で大域的に最適な歩行パターンとほぼ等しい目的関数の値を与える。しかし、局所的に著しく性能の悪い値を示す。これは、歩行パターンを固定したとき、目的関数が歩行速度といった環境変数の滑らかな関数とはならないことを示している。

すなわち、Hoyt らの実験の小馬のように、歩行速度といった環境の変化に対応して歩行パターンを変化させ、制御性能の劣化を低く抑えながら、歩行する４脚歩行ロボットを実現することは、ここで対象とした機構モデルをもつ４脚歩行ロボットで力学的には可能である。しかし、その実現のためには、歩行パターンを環境変化に対応し実時間できめ細かく調整することが必要である。我々は、４脚歩行ロボットに対し、脚先の接地センサー信号をフィードバック信号として歩行パターンを調整する歩行パターン制御則を提案している [2]。その制御則は、歩行速度といった環境の変化に対応し歩行パターンを変化させ、制御エネルギーの上昇を抑えた歩行を実現している。しかし、その力学的なメカニズムは、未だ明確ではない。今後、本研究結果を踏まえ、その力学的なメカニズムを明らかにしていく予定である。

参考文献

[1] D.F. Hoyt and C.R. Taylor: "Gait and Energetics of Locomotion in Horses," Nature, vol.292, pp.239-240

[2] 土屋和雄、辻田勝吉: "Central Pattern Generator モデルに基づく４脚歩行ロボットの歩行制御," 日本ロボット学会誌, vol.20 No.3, pp.243~246, 2002

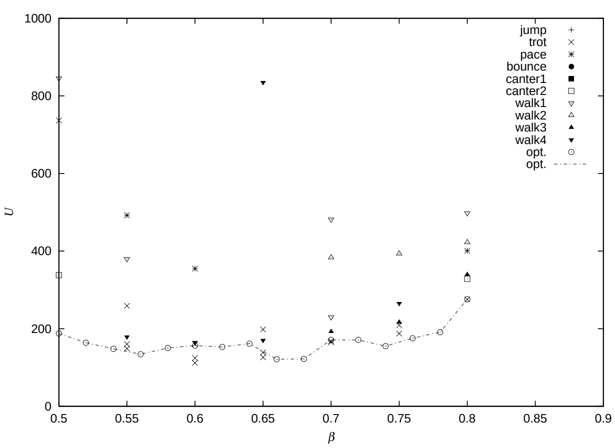

Fig. 5 the values of obj-func. $U(T_w = 0.80[s])$

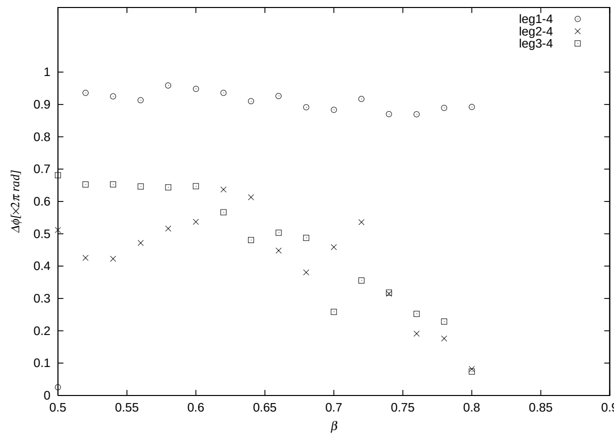

Fig. 6 the values of phase angles($T_w = 0.80[s]$)

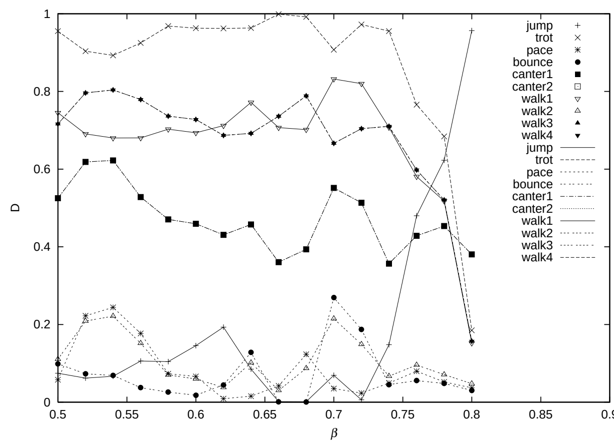

Fig. 7 the values of correlation $D(T_w = 0.80[s])$

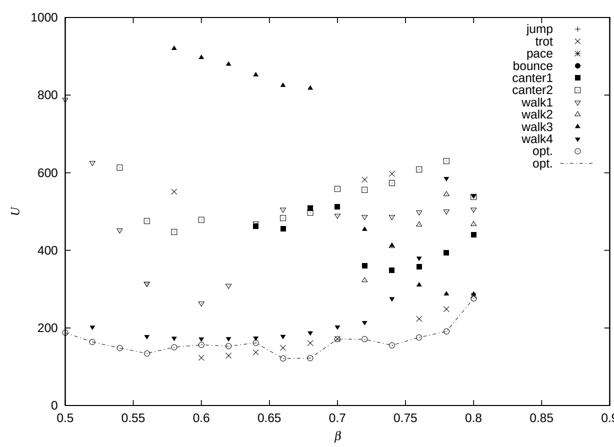

Fig. 8 the values of obj-func. $U(T_w = 0.80[s])$