

人間機械系におけるペダリング運動の最適機構 パラメータ*

浜田 祐一**・周 桑完**・宮崎 文夫**

Optimal Design Parameters for Pedaling in Man-Machine Systems*

Yuichi HAMADA**, Swan-wan JOO** and Fumio MIYAZAKI**

Pedaling is a typical example of the problem of man-machine interaction. The design of machines, bicycle, to make full use of human capabilities is an old but still challenging engineering problem. This paper describes optimal design parameters of a bicycle determined from several viewpoints, kinematics, statics, dynamics, and physiology. The efficacy of a new mechanism called "magic crank" that realizes an unconventional non-circular pedaling trajectory is also discussed.

1. はじめに

人間機械系の研究は極めて学際的であり、工学分野のみならず人間の構造、機能、挙動に関連する様々な科学分野の対象となっている¹⁾。簡単なタスクを実行する場合にも、操作対象である機械システムに加えて環境や人間の特性も考慮しなければならない。本論文で取り上げるペダリングタスクは、操作者である人間と自転車为一体となって機能する典型的な人間機械系であり、従来から多くの分野で取り上げられてきた。例えば制御分野では、人間の下肢の筋肉特性も考慮したペダリングモデルに基づき、最大速度でペダリングするための筋肉の最適制御パターンを求めた研究が Levine らによって行われている²⁾。また段野らは、ペダリングを人間と機械のインピーダンスマッチングの観点から捉えている³⁾。一方機械分野では、Miller らがパワーの伝達効率を最大化するチェーン伝達機構を提案している⁴⁾。人間工学やスポーツ科学の分野では、パワーの伝達効率が機構自体の機械的パラメータによって大きく変化することを実験を通して詳しく解析している⁵⁾⁶⁾。特に吉福は、瞬発的な最大パワーを出すためのクランク長やサドル高に対する条件を定性的に示すと同時に、クランク長が回転とともに変化する機構を導入することによって、下肢筋群から最大

のパワーを引き出せる可能性があるとした⁶⁾。

本論文は、以上に述べた吉福と同様の観点からペダリングタスクにおける機構パラメータの最適化を試みたものである。ただし、脚の長さや質量などの人間の身体パラメータに関する個人差のみならず、ペダリングにおける運動技能の個人差もペダル角度やペダルを踏み込むデータとして定量的に考慮する。その上で、様々な環境下での自転車走行を想定し、6種類の評価関数を導入してそれぞれに対する機構パラメータの最適値を求めるとともに、得られた結果についてその妥当性を検討する。さらに、新たに考案したクランク角度とともにその長さが変化する「マジッククランク機構」の位相を機構パラメータの1つに加え、最適化によって従来の機構を凌ぐ性能が引き出せることを示す。

2. モデリングとパラメータ同定

2.1 モデリングに必要なパラメータ・変数

次章において、ペダリング運動を評価する6つの手法を提案するが、それぞれの評価法で用いる力学モデルは異なる。それぞれのモデリングに必要なパラメータと変数を Table 1 に示す。Table 1 中のアルファベットは以下のような評価法を示している ([] 内は力学モデルを示している)。

- A. 可操作性楕円体⁷⁾による評価 [運動学]
- B. 操作力楕円体⁷⁾による評価 [静力学]

* 原稿受付 2000年3月13日

** 大阪大学 基礎工学部 Faculty of Engineering Science,
Osaka University; 1-3 Machikaneyamacho, Toyonaka
city, Osaka 560-8531, JAPAN

Key Words: Pedaling, Bicycle, Efficiency, Optimal Design

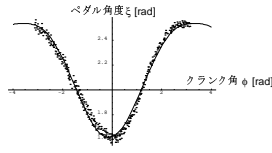


Fig. 3 ペダルの角度パターンの計測結果と近似した関数の一例
(軽速車 $x=0.160$ [m] $y=0.472$ [m] $W=80$ [W])

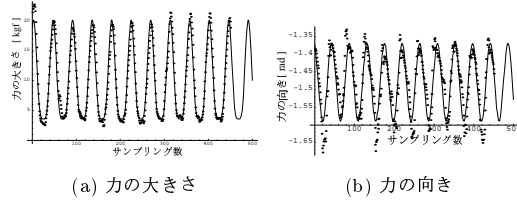


Fig. 4 カセンサーの値から計算される力の大きさと向きの一例

係数 a_ξ , b_ξ , c_ξ , d_ξ は, x , y , W , p を変量とする一次回帰式で近似する.

$$\begin{aligned} a_\xi &= a_\xi(x, y, W, p) \\ b_\xi &= b_\xi(x, y, W, p) \\ c_\xi &= c_\xi(x, y, W, p) \\ d_\xi &= d_\xi(x, y, W, p) \end{aligned} \quad (2)$$

クランク角度 ϕ に対する絶対座標系におけるペダルの角度 ξ のパターンの一例を Fig. 3 に示す.

同様にペダルの踏力パターン, つまり力の大きさ (Fig. 4(a) 参照) と力の向き (Fig. 4(b) 参照) を以下の関数で近似する.

$$\begin{aligned} f_m(\phi) &= a_m(1 + \sin(\phi + b_m))^2 + c_m \\ f_\mu(\phi) &= a_\mu(1 + \sin(\phi + b_\mu)) + c_\mu \end{aligned} \quad (3)$$

f_m は力の大きさ, f_μ は力の向きを表している. 近似した関数の係数をペダルの角度パターンを決定した時と同様に x , y , W , p を変量とする一次回帰式で近似する.

$$\begin{aligned} a_m &= a_m(x, y, W, p); & a_\mu &= a_\mu(x, y, W, p) \\ b_m &= b_m(x, y, W, p); & b_\mu &= b_\mu(x, y, W, p) \\ c_m &= c_m(x, y, W, p); & c_\mu &= c_\mu(x, y, W, p) \end{aligned} \quad (4)$$

(1)~(4) 式を使えば, 任意のペダル位置, 負荷, 上体の姿勢におけるペダルの角度パターンと踏力パターンを得ることができる. Fig. 5 にそれらを数例示す.

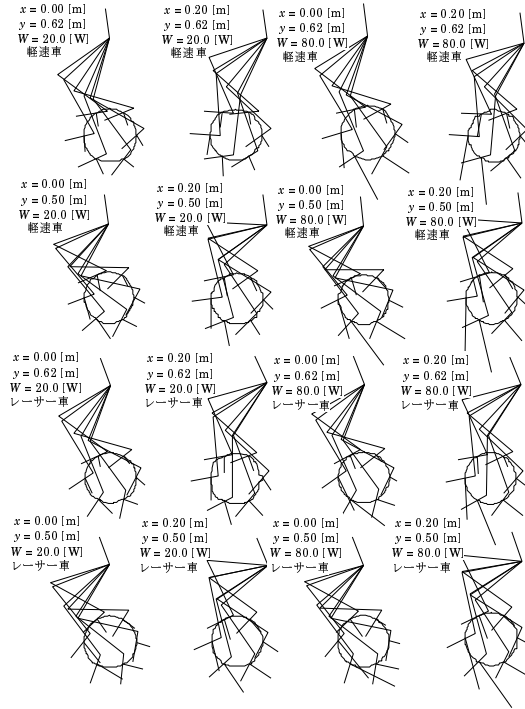


Fig. 5 ペダルの角度パターンと踏力パターン

3. ペダリング運動の評価

本章では提案する6つの評価法のうち3つ(可操作性楕円体・操作力楕円体・動的可操作性楕円体による評価)はロボットの動かしやすさを表現するために用いられている「操作性」に人間の性質(例えば, 関節の角度によって発生可能な最大関節トルクが異なる)を加味した評価法である.

3.1 評価法の提案

3.1.1 可操作性楕円体による評価

可操作性楕円体は「リンク機構の実現可能な手先速度の集合で, 関節角速度のノルムが1以下であるもの」と定義される. 言い換えると, 楕円体の径の長さは「手先速度の出しやすさ」を示している. この評価法で用いている力学モデルは次の運動学的関係式である.

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (5)$$

\mathbf{v} は絶対座標系における手先の速度, \mathbf{J} はヤコビ行列, $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ は関節角速度である.

この可操作性楕円体をペダリング運動を評価する目的で利用する (Fig. 6 参照). クランク軌跡上に多数の点 (N 個) をとり, それぞれの点 (i) について可操作性楕円体を

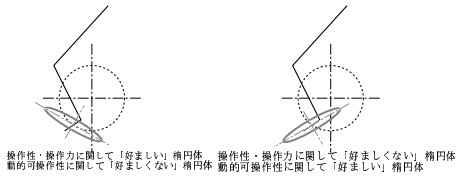


Fig. 6 好ましい楕円体と好ましくない楕円体

求め (Fig. 6 参照), ペダル軌跡の接線方向の径 ρ_i を算出し, それを一周期分足し合わせステップ数で平均したものをペダリング運動の評価値 W_1 とする.

$$W_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_i \quad (6)$$

3.1.2 操作力楕円体による評価

操作力楕円体は「リンク機構の実現可能な手先の力の集合で, 関節トルクのノルムが1以下であるもの」と定義される. 言い換えると, 楕円体の径の長さは「手先に発生できる力の出しやすさ」を示している. この評価法で用いている力学モデルは正規化された次の静力学的関係式である.

$$\tau^* = J^T F^* \quad (7)$$

τ^* は最大関節トルクで正規化された関節トルク, F^* は手先の力である.

この可操作力楕円体をペダリング運動を評価する目的で利用する. (7) 式は静力学的な関係であることから, 連続的に変化する系を評価するものではなく, なんらかの作業を始める瞬間, あるいは非常に低速な運動を評価する場合に有効な手法である. そこで, 可操作性楕円体による評価とは異なり, ペダルを踏み込む一部の区間において多数の点 (N 個) をとり, それぞれの点 (i) について操作力楕円体を求め (Fig. 6 参照), ペダル軌跡の接線方向の径 δ_i を算出し, それを足し合わせ, N で平均したものをペダリング運動における操作力楕円体による評価値とする.

$$W_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i \quad (8)$$

3.1.3 動的可操作性楕円体による評価

動的可操作性楕円体は「拘束をうけるリンク機構の実現可能な手先加速度の集合で, 関節トルクのノルムが1以下であるもの」と定義される. 言い換えると, 楕円体の径の長さは「手先に発生できる加速度の出しやすさ」を示している. この評価法で用いている力学モデルは次の動力学的関係式である.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) + q(\theta) = \tau \quad (9)$$

$M(\theta)$ は正則な慣性行列, $h(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力とコリオリ力を表す項, $g(\theta)$ は重力を表す項, $q(\theta)$ は外力を表す項, τ は関節トルクを表す項である.

この動的可操作性楕円体をペダリング運動の評価に適用する. もしも, 脚先に必要な加速度と楕円体の長軸方向が一致すれば, その姿勢において「操作性が良い」ということになる. 自転車が定速で走行していることを仮定するとペダリング運動は平面内の等速円運動となる. 加速度の観点から見れば, 中心方向の加速度が必要である (Fig. 6 参照) から, ペダル軌跡上に多数の点 (N 個) をとり, それぞれの点におけるクランク軸方向の楕円体の径 η_i を計算し, それらの平均を動的可操作性楕円体による評価値とした.

$$W_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (10)$$

3.1.4 消費エネルギーによる評価

この評価法では人間と全く同じ形状のロボットがペダリング運動した際の消費エネルギーを評価値とする. (9) 式において逆動力学で計算される関節トルク τ_i と (5) 式で計算される関節角速度 $\dot{\theta}_i$ の積の時間積分から, 各関節で消費されるエネルギー T_i を計算する.

$$T_i = \int \tau_i \dot{\theta}_i dt \quad (11)$$

そして, 全関節で消費されるエネルギーをこの評価法における評価値 W_4 とする.

$$W_4 = \sum_{i=1}^3 T_i \quad (12)$$

3.1.5 無酸素性作業閾値による評価

「消費エネルギーによる評価」では, 人間はロボットと同様に関節トルクと関節角速度を乗じた仕事率を時間積分したエネルギーを消費すると仮定しているが, 実際には, これを人間の運動の評価に用いることはできない. 人間には必ず運動の限界があり, その限界の運動に近ければ近い程人間の「疲労」は漸的に増加する. ロボットにおけるのエネルギー消費を「疲労」とみなすと, 人間とロボットの疲労-負荷グラフは Fig. 7 の様になる.

そこで, 本論文では人間は楽な (負荷の少ない) 運動をしている時は, ほとんど疲労はせず, 無理な運動 (負荷の大きい) 運動をしている時は, 疲労すると考える. これは運動生理学の分野において, 無酸素性作業閾値 (AT, Anaerobic threshold) と呼ばれる量で説明されている¹⁰⁾¹¹⁾. 例として, Fig. 8 のような2つの仕事率パターンを考える. 仕事率 (負荷) を時間積分した消費エネルギーはほぼ同一

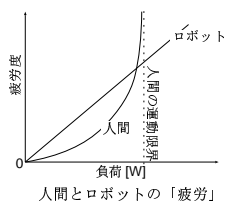


Fig. 7 人間の疲労について

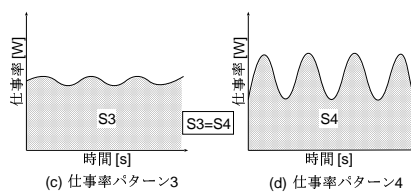


Fig. 10 負荷パターンの違い

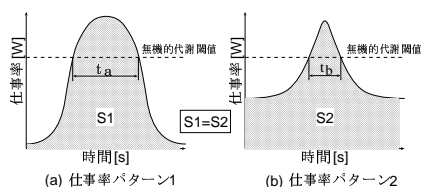


Fig. 8 過無酸素性作業閾値区間について

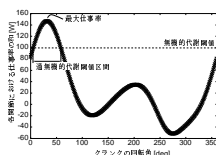


Fig. 9 各関節における仕事率の和の変化

である。(a)の仕事率パターンにおいての無酸素性作業閾値を超えている範囲 t_a は(b)の閾値を超えている範囲 t_b より大きい。無酸素性作業閾値を考慮するならば、(a)の仕事率パターンの方が人間にとって疲労は大きなものとなる。

この無酸素性作業閾値を用いてペダリングを評価する。(9)式の動力学方程式において逆動力学を用いて、関節それぞれのトルクを算出し、それに関節角速度をかけることにより、各関節の瞬間的な仕事率を計算する。ペダリングにおける関節の仕事率の変化の一例をFig. 9に示す。人間にとって「やさしい」運動とは、なるべく無酸素性作業閾値以下で運動することと考え、評価値を仕事率が無酸素性作業閾値以上である時間 t_{AT} の全運動時間 t_{all} に対する割合とする。

$$W_5 = \frac{t_{AT}}{t_{all}} \quad (13)$$

この評価値は前節の消費エネルギーによる評価同様、評価値が小さい程良い。

3.1.6 最大仕事率による評価

人間は高負荷の運動を短時間に行なう方が低負荷の運動を持続的に行なうよりも疲労感は大きいと考えると、

Table 2 評価に用いたパラメータ

パラメータ	数値
道の傾斜 [°]	2.0
ギア比	1.0
速さ [km/h]	5.0
後輪の半径 [m]	0.325
クランクの長さ [m]	0.17
大腿部の長さ [m]	0.42
下腿部の長さ [m]	0.40
足の長さ [m]	0.26
足首関節から踏み込む位置までの長さ [m]	0.07
無機代謝閾値 [W]	120
脚の慣性	文献 ⁸⁾
最大関節トルク	文献 ⁹⁾
腰の角度 (軽速車) [°]	8.0
腰の角度 (ロードレーサー車) [°]	15.0

Fig. 10 で示すように同じエネルギーを消費する運動であっても、平均的に負荷がかかる場合(c)の方が負荷の最大値が大きい場合(d)よりも人間にとって「やさしい」ということになる。負荷が大きい運動を避けることにより人間は持続的な運動が可能となる。つまり、負荷の最大値を小さくすれば良い。そこで、この負荷(仕事率)の最大値 P_{max} を評価値とする

$$W_6 = P_{max} \quad (14)$$

のような評価法を考える。 W_6 は小さい程、自転車の操作性が良いということになる。

3.2 評価値の計算とその考察

前節で紹介したペダリングの評価値をTable 2の条件で計算する。サドル位置を前後上下させたときの、それぞれの評価値($W_1 \sim W_6$)をFig. 11に示す。Fig. 11の結果は軽速車の乗車姿勢を考えた場合の評価値である。

また、軽速車とロードレーサー車の乗車姿勢を比較するため、腰の角度以外のパラメータを統一して評価値を

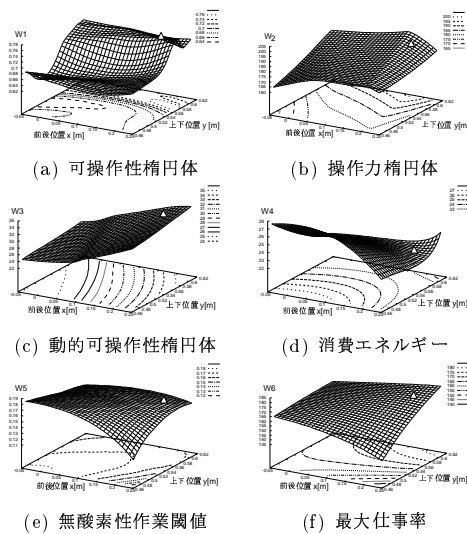


Fig. 11 評価法の比較

計算した結果を Table 3 に示す[†].

3.2.1 可操作性楕円体による評価について

この評価法において、サドルが高いほど操作性は良いということがわかる。実際に被験者に自転車を十数分間こいでもらい、運動後に感想を求めた。その中で、サドルが高ければ、

- 腿の単純な上下動だけだから楽
- 膝の動かす範囲が小さい
- 足首を不必要に動かさずに運動ができる

サドルが低ければ、

- 膝が前後運動して、それが負担となる
- 膝の動きが不自然

という感想があった。これは、サドルが高ければ運動学的に無理が無く、少ない関節の動きでペダリングに必要な

Table 3 ロードレーサー車と軽速車の評価値の比較

評価法	軽速車	レーサー	操作性向上 [%]
可操作性	0.6613	0.6656	+6.56
操作力	150.0	150.1	+0.36
動的可操作性	30.77	31.08	+1.00
エネルギー	23.75	22.52	+5.18
無酸素作業	0.1693	0.1533	+9.45
最大仕事率	168.7	160.8	+4.70

[†] 可操作性楕円体、操作力楕円体、動的可操作性楕円体の場合は評価値が大きい程、操作性は良く、一方、消費エネルギー、無酸素代謝閾値、最大仕事率による評価の場合は評価値が小さい程良い。

な大きな足先の動きが得られることを意味しており、可操作性楕円体による評価を支持するものであると考えられる。

3.2.2 操作力楕円体による評価について

操作力楕円体による評価は、自転車のこぎ始め、あるいは非常に低速な場合を評価することに有効であることは先に述べた。そのような場合は、サドルは高い程良いということが評価結果からわかる。

3.2.3 動的可操作性楕円体による評価について

この評価法は関節角度によって発生できる最大トルクで正規化した動力学モデルを使っているため、パラメータ・変数の正確な測定が可能であるならば、非常に強力な評価法となる。この評価法によれば、サドル位置はクランク中心から離れていれば離れている程良い。これは一般に市販されている自転車のサドル位置と非常に近い。

3.2.4 消費エネルギーによる評価について

消費エネルギーによる評価も動的可操作性楕円体による評価同様、サドルは上下方向、前後方向問わず、クランク中心から離れていれば離れている程、評価値は良くなる。ただし、あまり離れすぎると(前後位置 $x=0.25$ [m]、上下位置 $y=0.62$ [m] 付近)、評価値が悪くなる。これに関する考察は本論文では行っていないが、工学的に非常に興味深いものである。

3.2.5 無酸素性作業閾値による評価について

無酸素性作業閾値による評価によれば、サドルは低く後方にある方が良いことがわかる。この結果から、長い距離を走る場合はサドルを低く後方にすると良い。無酸素性作業閾値による評価と最大仕事率による評価は、消費エネルギーによる評価と同様に、ペダリングの仕事率パターンを評価している。しかし、消費エネルギーによる評価は、その仕事率パターンの「面積」((11)式参照)を評価しているのに対して、無酸素性作業閾値による評価と最大仕事率による評価は仕事率パターンの形(Fig. 8, Fig. 10 参照)を評価している。消費エネルギーによる評価の結果と無酸素性作業閾値・最大仕事率による評価の結果が全く異なることは特筆すべき点である。

3.2.6 最大仕事率による評価について

最大仕事率による評価によれば、無酸素性作業閾値の評価と同様、サドルは低く後方にある方が良いことがわかる。この結果から、脚に障害があるなどして、脚にかかる瞬間的な負荷を抑える必要がある場合は、サドルを低く後方に配置すれば良いということがわかる。

3.2.7 市販されている自転車との比較

Fig. 11 中には一般に市販されている軽速車のサドル位置が示してある。無酸素性作業閾値・最大仕事率による評価以外の評価法では、最適なサドル位置と市販されて

いる軽速車のサドル位置はほぼ同じである。この結果から、人間が経験的に決定したサドル位置は本報告で提案する解析的評価から非常に合理的な位置にあるということがわかった。

3.2.8 自転車のタイプによる違いについて

自転車のタイプ、ここでは軽速車とロードレーサー車の評価値の違いについて考察する。ロードレーサー車の全ての評価値は軽速車の評価値よりも良い値であった。これは、ロードレーサー車の乗車姿勢が運動学的・動力学的に「人に優しい姿勢」であることがわかる。特に、無酸素性作業閾値による評価はロードレーサー車は軽速車よりも9.45%も操作性が良い。消費エネルギーの面でも操作性が5.18%良い(エネルギー消費が5.18%少ない)。長い距離を自転車で走る場合、ロードレーサー車が圧倒的に良いことがわかる。操作性が良いロードレーサー車が軽速車と比べて一般に普及していないのは、一般の人にとってロードレーサー車は高価で乗り心地が悪い上、安定性・操縦性を修得することが難しいためだと考えられる。

3.3 評価法の応用

本研究で提案する評価法を利用して、様々な機構パラメータを決定できる。前節では最適なサドル位置を求めた。このように既存の自転車のパラメータを評価することが可能である一方、新しい機構の自転車の設計にも応用が可能である。

本節では、その一例として周¹²⁾が設計・製作したペダルがリマソン軌跡を描くクランク機構(マジッククランク, Fig. 13 参照)を評価する。リマソン曲線とは中心角の変化とともに径の長さが三角関数的に変化する曲線のことである。リマソン曲線の径 ρ は中心角 θ により以下のように表される。

$$\rho = R + \varepsilon \sin \theta \tag{15}$$

ここでは、 ε/R を偏心率と定義する(R は基準半径、 ε は任意の定数)。

マジッククランクの特徴は調節ネジにより、クランク機構全体を変更せずともリマソン曲線の位相を変化させることが出来ることである。つまり、マジッククランクを備え付けた自転車であれば、その運動環境・用途に応じて容易にペダル軌跡を変更することが可能である。それぞれの評価法における計算結果を Fig. 14 に示す。また、Fig. 13 のマジッククランク(偏心率0.15)を用いた場合のそれぞれの評価法における最適評価値を Table 4 に示す。

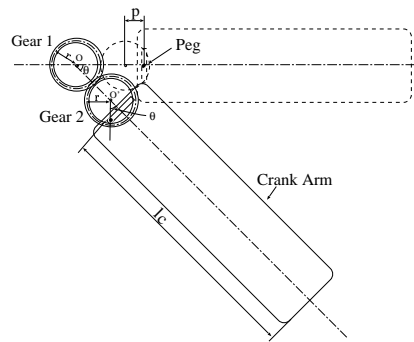


Fig. 12 マジッククランク



Fig. 13 自転車に取り付けられたマジッククランク

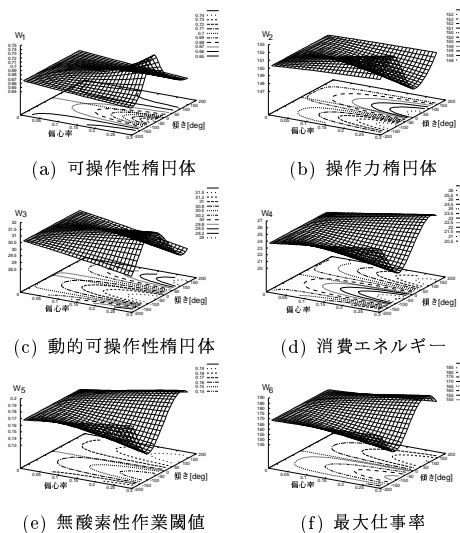


Fig. 14 マジッククランクの評価

4. 結言

本論文では、人間機械系の1つとして自転車のペダリング運動を取り上げ、機構パラメータの最適化について考察した。様々な観点から人間機械系の評価を行なった結果、長い歴史の中で現在に至っている自転車の構造の妥当性とともに、可変長クランク機構の導入によって更なる性能向上が期待できることを示した。ペダリングは、

Table 4 マジッククランクによる操作性の向上

評価法	評価値	位相 [deg]	操作性向上 [%]
可操作性	0.6831	-48.0	+3.29
操作力	151.5	-108.0	+1.01
動的可操作性	31.20	-60.0	+1.40
エネルギー	21.84	-60.0	+8.04
無酸素作業	0.1483	-84.0	+12.38
最大仕事率	157.1	-84.0	+6.90

人間の下肢の機能を回復させるリハビリテーションにも適しており、本論文はそのための機構設計の一助になるものと考えられる。

参考文献

- 1) Thomas B. Sheridan and William R. Ferrel: Man-Machine systems; Information, control, and decision models of human performance, MIT Press (1974)
- 2) William S. Levine and Gerald E. Loeb: The neural control of limb movement; IEEE Control Systems, Dec., pp. 38-47 (1992)
- 3) 断野, 林, 朝倉: 人間の運動インピーダンスマッチングーペダリングの場合ー; 計測自動制御学会論文集, Vol. 29, No. 8, pp. 973-975 (1993)
- 4) N. R. Miller and D. Ross: The design of variable-ratio chain drives for bicycles and ergometers- application to a maximum power bicycle drive; J. of Mechanical Design, Vol. 102, pp. 711-717 (1980)
- 5) G. Groot, E. Welbergen, L. Clijsen, J. Clarijs, J. Cabri, and J. Antonis: Power, muscular work, and external forces in cycling; Ergonomics, Vol. 37, No. 1, pp. 31-42 (1994)
- 6) 吉福: 身体パワーを最大にする自転車の最適設計; パイオメカニクス学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 110-117 (1992)
- 7) 吉川: ロボット制御基礎論; コロナ社, 1998
- 8) Charles E. Clauser: Weight, volume and center of mass of segments of the human body; Aerospace Medical Research Laboratory, 1969
- 9) 橘: クランク回し運動の解析的評価に基づく下肢関節の運動パターンの影響と機構に関する考察; 大阪大学基礎工学部特別研究, 1999
- 10) 伊東: ATを基準とした運動療法, 呼吸と循環, 第40巻, 第12号, 医学書院, 1992
- 11) 石黒 他: 性別・年齢別にみた推定最高心拍数の75%水準での酸素摂取量, 体育の科学, 第43巻, 第5号, 1993
- 12) 周, 蝦, 宮崎: ペダリング運動の解析的評価に基づくクランク機構の最適設計; ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A1-32-038(1) (1999)