

受動歩行ロボットのロバスト性と
新しい可変剛性アクチュエータ

2008年2月15日

Ivar Thorson

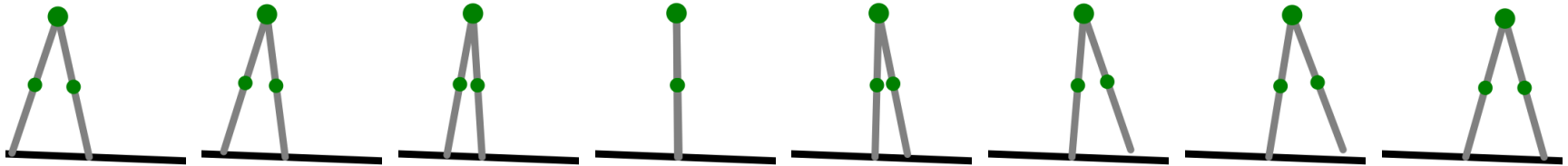
名古屋大学大学院
宇野研究室

発表の流れ

発表の流れ：

1. 受動歩行ロボットの欠点
2. 歩行ロボスタ性の二つの定義
3. 新しいシミュレーション
4. データ、結論
5. 新しい可変剛性アクチュエータ
6. まとめ、今後の課題

研究背景：受動歩行の欠点



- 安定なリミットサイクルを持つロボットは歩けるが、ロバストではない
- 受動歩行の三つの設計問題：機械システム、制御システム、アクチュエータ
- 今日取り扱う質問：
 1. どのように受動歩行ロボットのロバスト性を測るか
 2. どのようなアクチュエータが受動歩行ロボットに適しているか

安定性とロバスト性の違い

安定性vs.ロバスト性（軌道の微分特性vs.外乱抑圧）

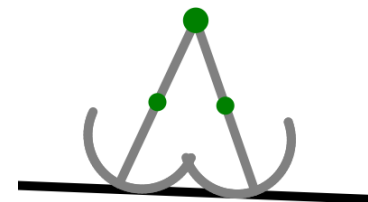
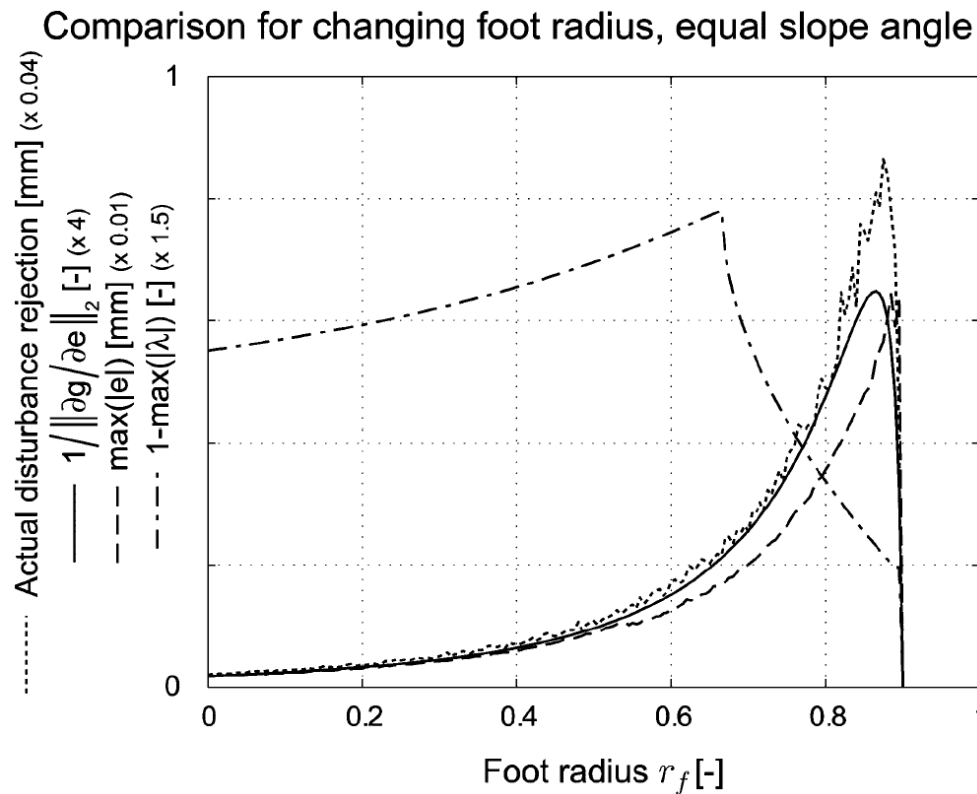
- 歩行安定性とは、「微小外乱に対して、歩行を継続できる」ことを意味する
- 歩行ロバスト性とは、「大きな外乱に対して、歩行を継続できる」ことを意味する

一般的な安定性解析方法は、ポアンカレ写像のヤコビ行列のスペクトル半径で判定する（つまり、最大の固有値の大きさで）

- 安定性には、固有値を用いる解析でよい
- 非線形性の強いシステムには、ロバスト性とあまり相関しない

先行研究

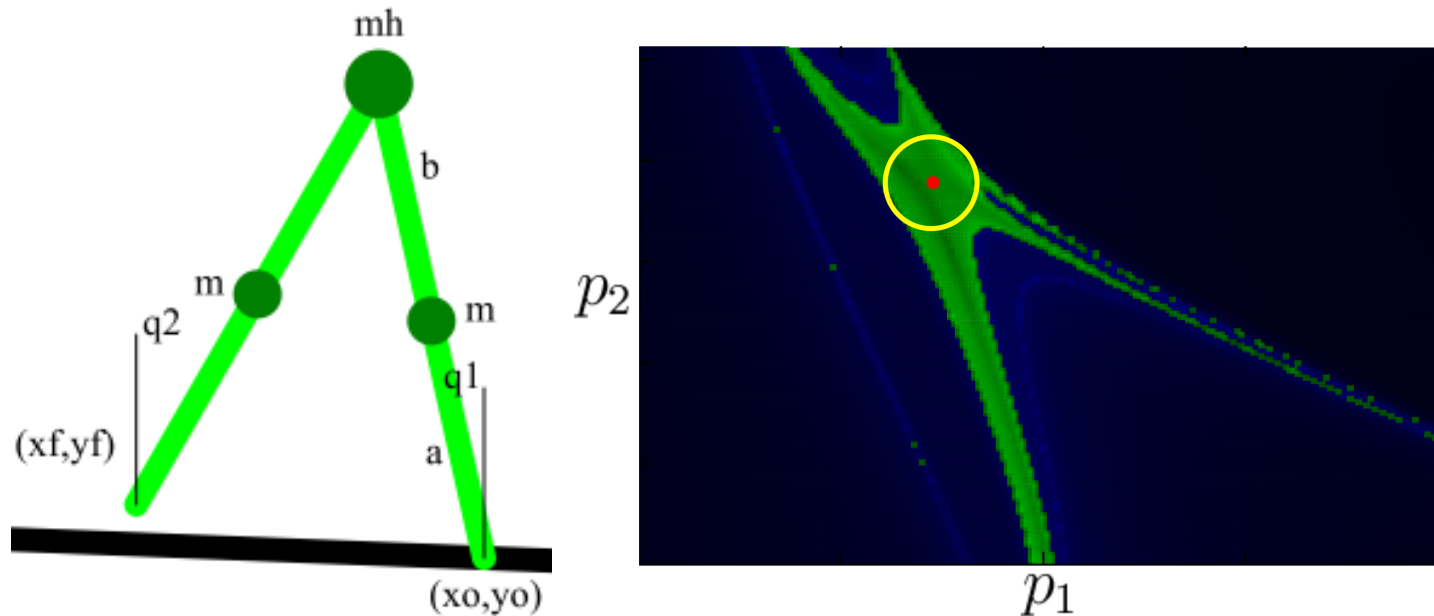
- 「実際のロバスト性」は平均の100歩で倒れるように、一歩ごとに加えられるランダム摂動の大きさを測る



Source: "A Disturbance Rejection Measure for Limit Cycle Walkers: The Gait Sensitivity Norm" by D. Hobbelen, M. Wisse

本論文はどんなロバスト性の測り方を提案するのか

- 任意の瞬間的な摂動は一般化運動量の変化として表される
- リミットサイクルから引き込み領域の外まで移動させるようなシステム一般化運動量に変化を与える最小外乱の大きさにより、受動歩行ロボットのロバスト性が測れると提案する



上：衝突瞬間直後の一般化運動量。赤い点はリミットサイクル、緑範囲は引き込み領域、黄色円は耐えられる外乱の大きさ

「外乱の大きさ」というのは、どういう意味

この発表では、二つの「外乱の大きさ」の定義を用いる：

1. 外乱の大きさはインパルスの大きさを測る。単位は運動量。 (r_{IDR} : Impulse Disturbance Rejection)
2. 外乱の大きさはメトリックテンソルで測る。単位はエネルギー。 (r_{EDR} : Energy Disturbance Rejection)

r_{IDR} の定義

The “Impulse Disturbance Rejection” radius r_{IDR} of a system with generalized momenta p is defined as

$$(x^*, y^*) = \arg \min \|p_x - p_y\|_2, x \in \mathbb{Q}_{NR}, y \in \mathbb{Q}_{LC}$$

$$\Delta p_{IDR} = x^* - y^*$$

$$r_{IDR} = \min \|\Delta p_{IDR}\|_2,$$

where \mathbb{Q} is the configuration space of the system, $\mathbb{Q}_{LC} \subseteq \mathbb{Q}$ are states passed through during a circuit of the limit cycle, and $\mathbb{Q}_{NR} \subseteq \mathbb{Q}$ are states which result in the system not returning to the limit cycle. The notation $(\dots)_x$ means evaluated at a point x .

r_{EDR} の定義

The “Energy Disturbance Radius” r_{EDR} is defined as the change of kinetic energy resulting from an impulse disturbance:

$$(x^*, y^*) = \arg \min (p_x - p_y)^T M^{-1} (p_x - p_y), x \in \mathbb{Q}_{NR}, y \in \mathbb{Q}_{LC}$$

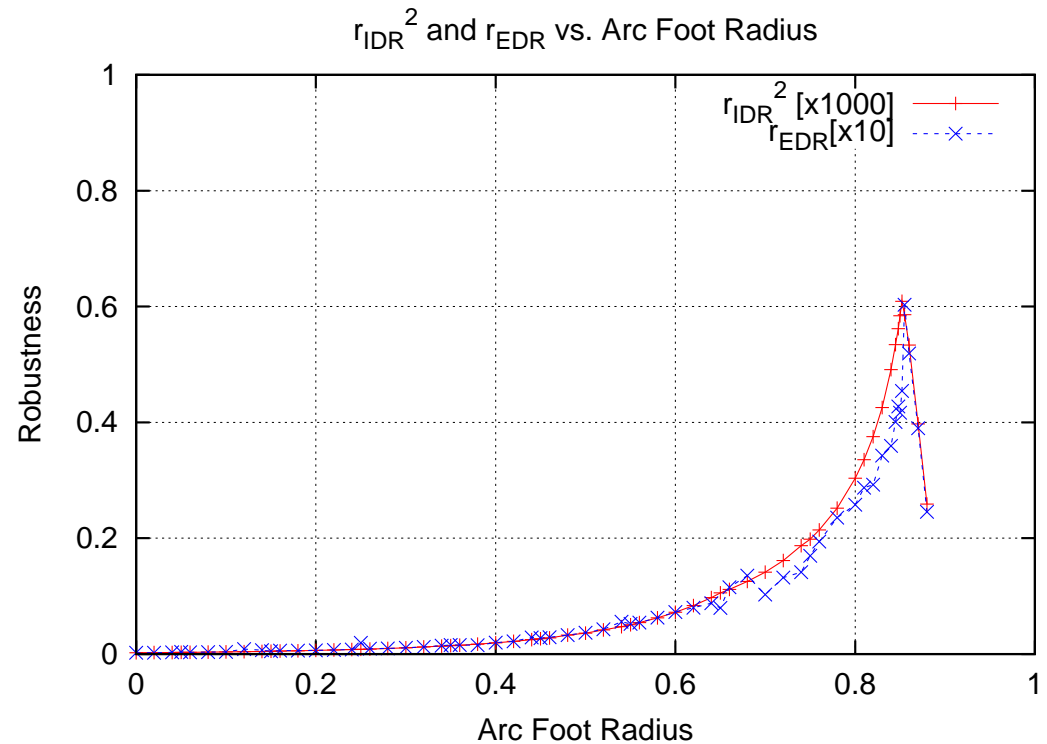
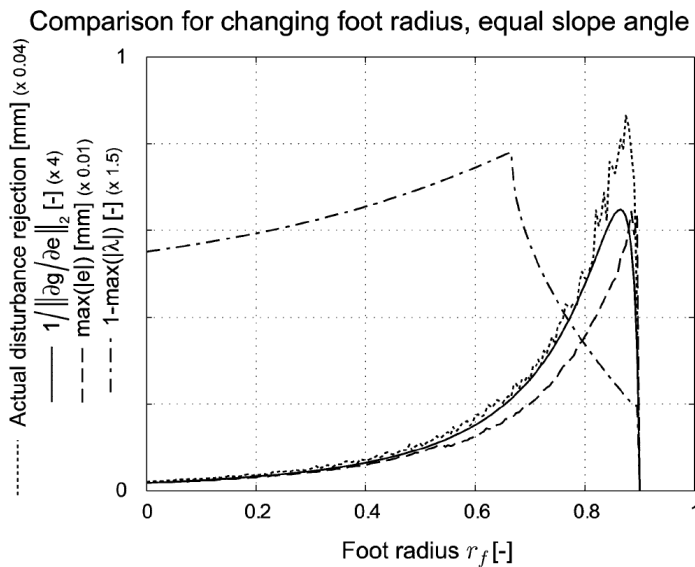
$$\Delta p_{EDR} = x^* - y^*$$

$$r_{EDR} = \min \Delta p_{EDR}^T M^{-1} \Delta p_{EDR},$$

Here M is the inertial matrix (tensor) of the Lagrangian system. Since M is a metric tensor of a Riemannian space and p is a linear space, r_{EDR} is a coordinate invariant quantity. We could also have written $r_{EDR} = \Delta \dot{q} M \Delta \dot{q}$ if we wished to express r_{EDR} in terms of generalized velocities.

実際のロバスト性と相関するか

- r_{IDR}^2 (赤) と r_{EDR} (青) は固有値よりよく相関する
- 最悪な外乱の大きさを測るので、実際の歩行ロバスト性を少し過小評価する



r_{IDR} と r_{EDR} の利点は何か

- r_{EDR} はあらゆる座標系において不変
- 以下の2つは明確な物理的な意味を持つ：「どのくらい強くぶつかれば倒れない？」
 - r_{IDR} はぶつかりからの運動量変化で大きさを測る
 - r_{EDR} はぶつかりからの運動エネルギー変化で大きさを測る
- 確率的ではなく、確定的。（計算量はより小さい）
- 保守的：最悪な外乱に対してのロバスト。設計に役立つ。

r_{IDR} と r_{EDR} の欠点は何か

- r_{IDR} か r_{EDR} を解析的に求めることは困難
- 従って、シミュレーションで求める
- 2自由度のシステムには、 r_{IDR} と r_{EDR} の計算時間は約3分
- 今からシミュレーションを説明する

シミュレーション機能

The screenshot displays a simulation environment with a biped robot model on the left and a configuration panel on the right. The robot model consists of a red ground plane, a yellow torso, green legs, and blue joints. The configuration panel is divided into several sections: 'Robots' (listing biped-torso-d, biped-torso-mt, biped-feet-r, and biped-compass-a), 'Objects in Simulation' (listing biped-torso-d, biped-hip-spring-k, biped-feet-r, and biped-compass-a), and 'Automated Searches' (listing find-lc-wide, find-lc.compass-biped, find-lc, and log-secs-01). The 'Object Properties' section on the right contains detailed parameters for the selected object, including A, B, CONTROLLER, DEBUG, DT, DTTRN, G, HIP-GAIN, IDR, IDR-DIR, INIT-GENMOMS, INIT-PHASE, INIT-STATE, LAST-CONDITION, LC-MOMS, LC-PHASE, LC-STATE, LINK-COLOR, M, MH, OBJ-NAME, PAUSED, PHASE, PHI, PREV-STEP-TIME, PROPS, SEARCHER, STATE, STEP-ENERGY-DELTA, STEP-LENGTH, STEP-TIME, and STEPS. The bottom of the panel shows 'Global Pause:Off FPS:432 OpenGL:On'.

```
Resetting object #<FEET-BIPED {B665811}>
Unpausing object #<FEET-BIPED {B665811}>
Pausing object #<FEET-BIPED {B665811}>
Editing object: #<COMPASS-BIPED {B665821}>
Unpausing object #<COMPASS-BIPED {B665821}>
Pausing object #<COMPASS-BIPED {B665821}>
Editing object: #<TORSO-BIPED {CA83539}>
Editing object: #<TORSO-BIPED {CA83539}>
Editing object: #<HIP-SPRING-BIPED {B665801}>
Editing object: #<HIP-SPRING-BIPED {B665801}>
Editing object: #<HIP-SPRING-BIPED {COEAE01}>
Editing object: #<COMPASS-BIPED {COEAE21}>
Editing object: #<COMPASS-BIPED {COEAE21}>
```

Robots:

- biped-torso-d=0.180
- biped-torso-mt=0.000
- biped-torso-mt=0.010
- biped-torso-mt=0.020
- biped-torso-mt=0.030

Objects in Simulation:

- []biped-torso-d=0.180
- []biped-hip-spring-k=2.100
- []biped-feet-r=0.300
- []biped-compass-a=0.630

Automated Searches:

- find-lc-wide
- find-lc.compass-biped
- find-lc
- log-secs-01

Object Properties:

A : 0.63d0
B : 0.37d0
CONTROLLER : NIL
DEBUG : NIL
DT : 0.01d0
DTTRN : 1.d-6
G : 9.81d0
HIP-GAIN : 10.0
IDR : 0.008609085155179049d0
IDR-DIR : #<REAL-MATRIX 1 x 2'n 8.44066E-2 -.85212
INIT-GENMOMS : #<REAL-MATRIX 1 x 2'n 8.44069E-2 -.
INIT-PHASE : #<STANDARD-GENERIC-FUNCTION PHASE-:
INIT-STATE : #<REAL-MATRIX 1 x 4'n -.31526 0.21054
LAST-CONDITION : WALKED
LC-MOMS : #<REAL-MATRIX 1 x 2'n 8.76754E-2 -.93389
LC-PHASE : #<STANDARD-GENERIC-FUNCTION PHASE-SI
LC-STATE : #<REAL-MATRIX 1 x 4'n -.31526 0.21054
LINK-COLOR : (1.0 0.0 0.0)
M : 0.25d0
MH : 0.5d0
OBJ-NAME : biped-compass-a=0.630
PAUSED : T
PHASE : #<STANDARD-GENERIC-FUNCTION PHASE-SING
PHI : 0.05235987755982989d0
PREV-STEP-TIME : 2.4630857749687647d0
PROPS : NIL
SEARCHER : NIL
STATE : #<REAL-MATRIX 1 x 4'n -.31250 0.18923 0
STEP-ENERGY-DELTA : -1.0690364149468223d-8
STEP-LENGTH : 0.5197589092937164d0
STEP-TIME : 0.615771443742184d0
STEPS : 4.0

Global Pause:Off FPS:432 OpenGL:On

新しい剛体システムシミュレーション

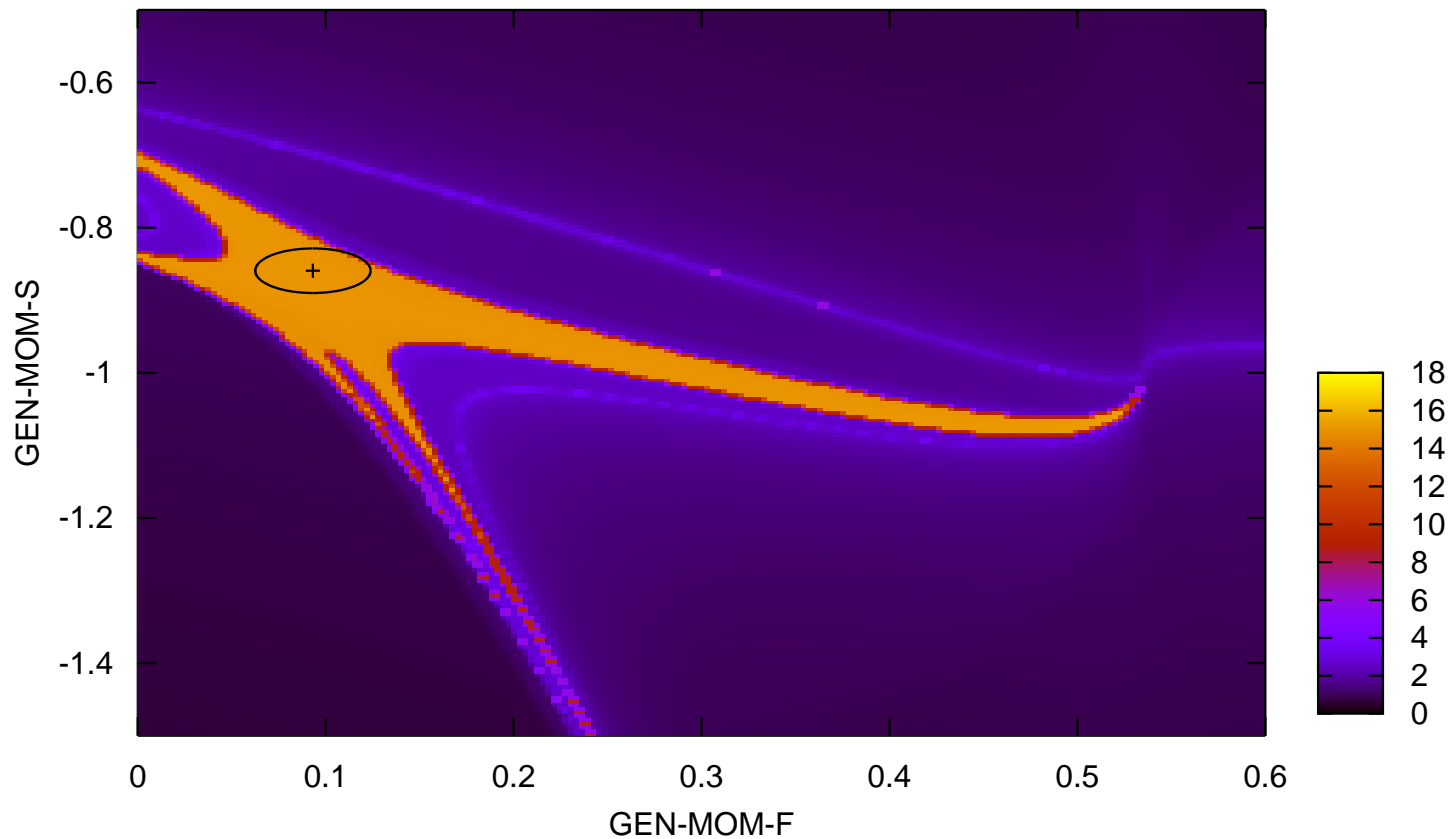
シミュレーション機能

- 複数のロボットシミュレーションを同時に実行するのは可能
- リアルタイムでロボットのパラメータ調整は可能
- 自動的に r_{IDR}, r_{EDR} を計測
- 画像出力はOpenGLまたはPNGファイル
- パラメータの変更やモデルの保存・開くのは簡単
- 自動的にプロットできる
- 自動的にリミットサイクルを導ける
- 分岐のプロットもできる
- 割線法とルンゲクッタ法で計算が速い
- プログラムのデバッグ、コンパイル、インタプリテーションは実行しながら出来る

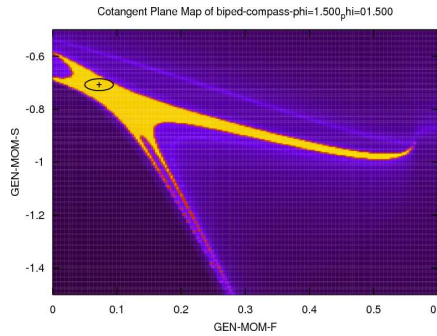
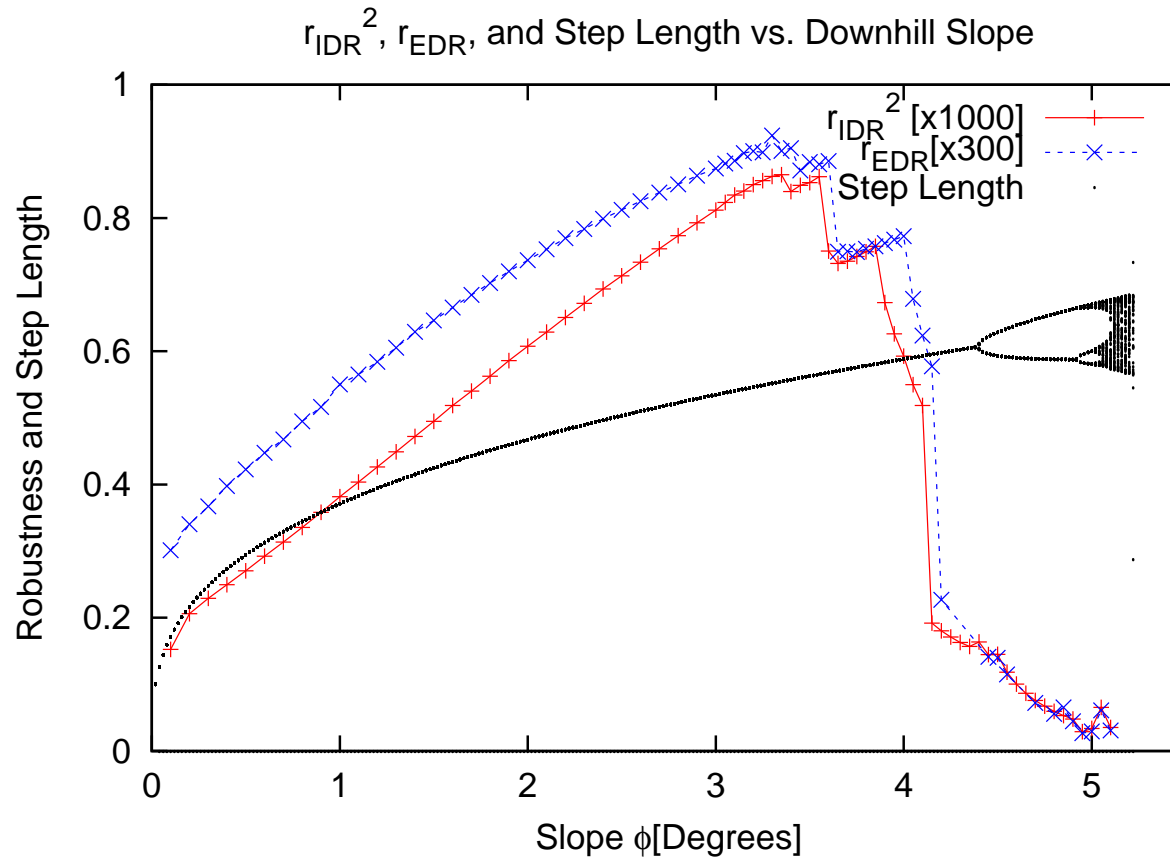
シミュレーション機能

- 自動的に (p_1, p_2) 平面をプロットして、ロバスト性を計測
- 黄色範囲は引き込み領域、楕円は r_{IDR}

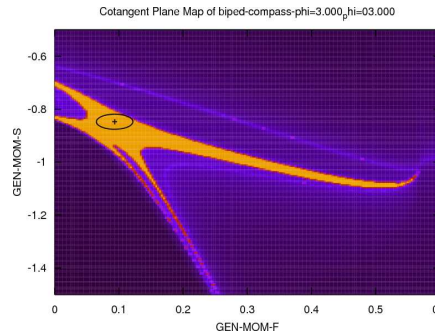
Cotangent Plane Map of biped-compass-a=0.520_phi=03.000



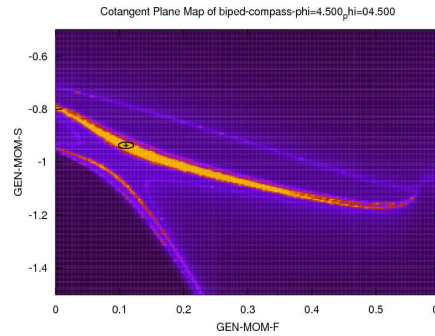
実験：斜面が変われば、 r_{IDR} と r_{EDR} はどのように変更するか



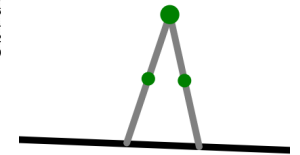
1.5 deg



3.0 deg



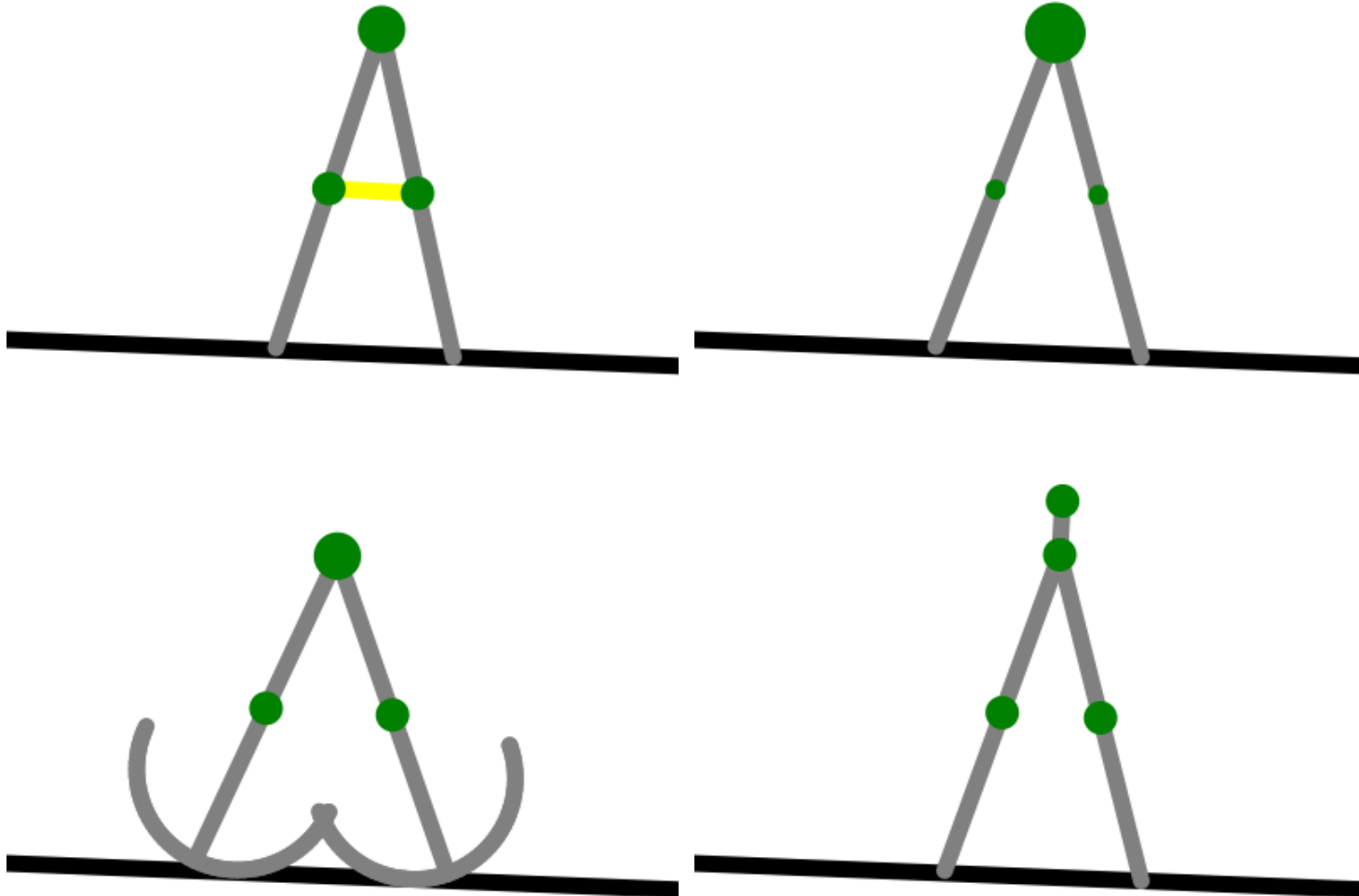
4.5 deg



Model

r_{IDR} を用い、ロボットの設計パラメータを検討したら

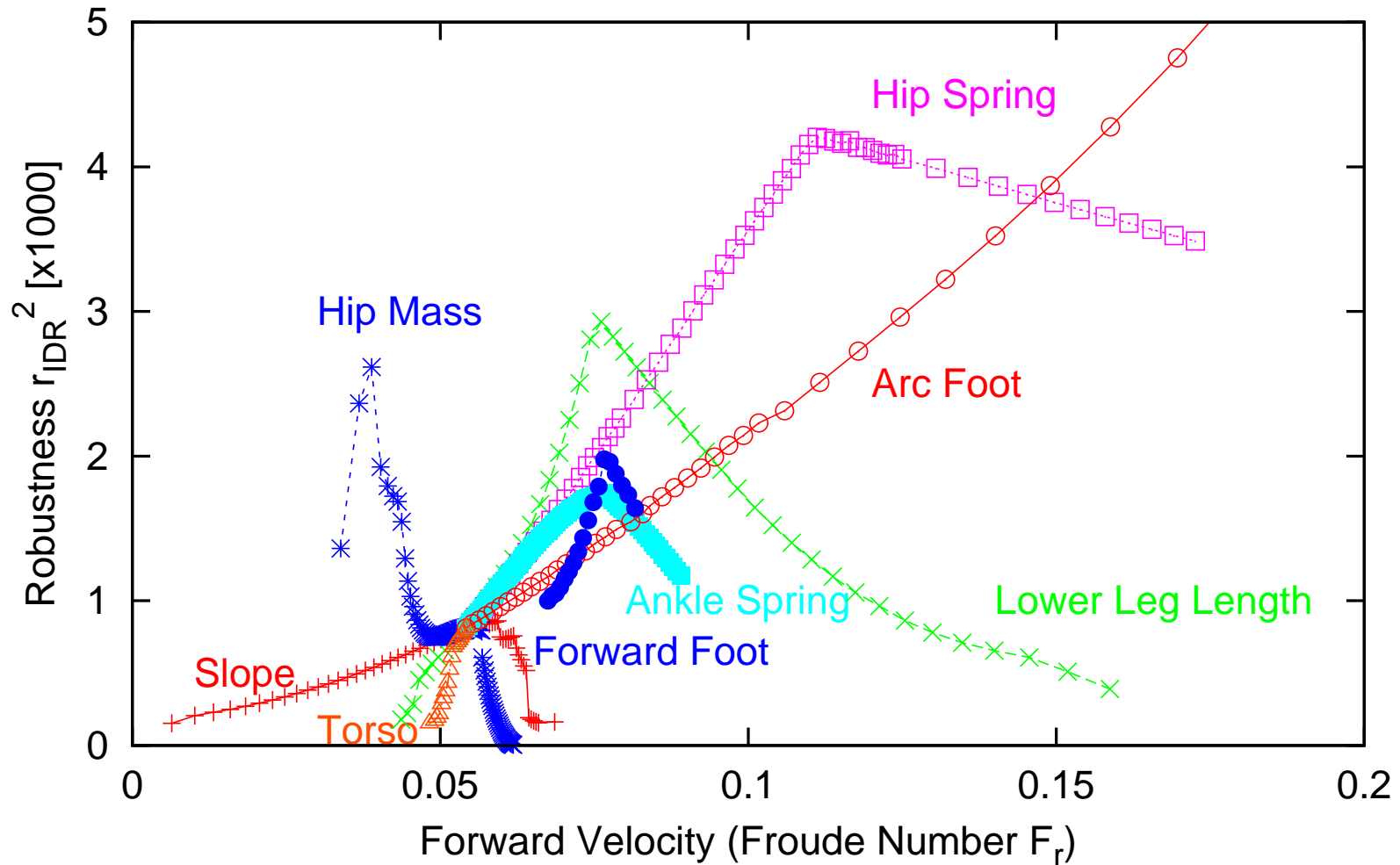
設計パラメータがロバスト性に与える影響を検討しましょう



r_{IDR} データのまとめ

ロバスト性 vs. 無次元化した歩行速度

r_{IDR}^2 vs. Froude Number for many types of robots



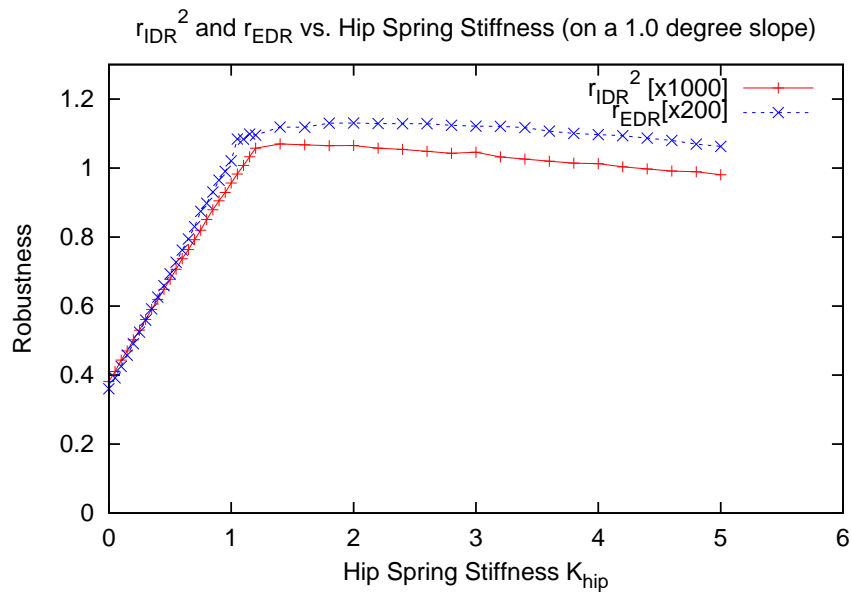
データを考慮した結論

結論：

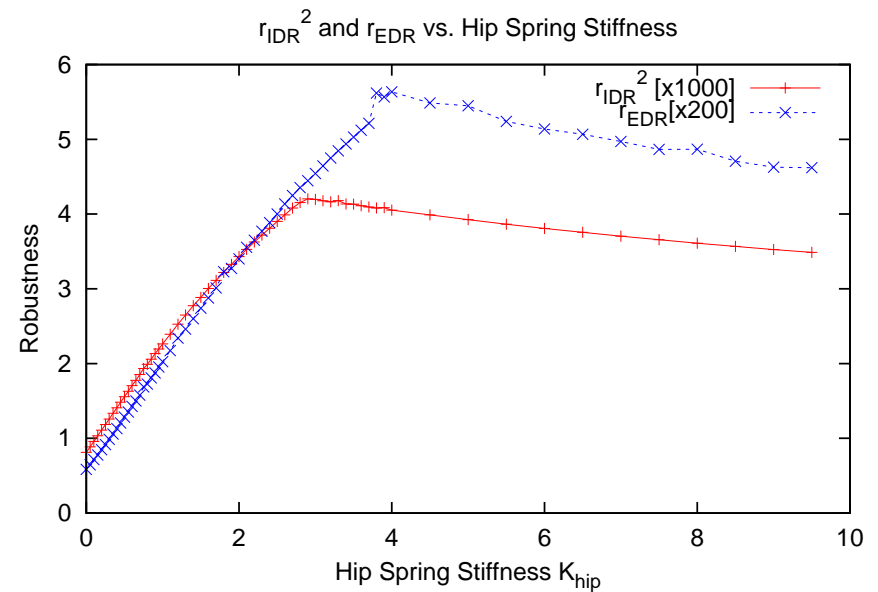
- 遊脚の自然振動周波数を変えるパラメータはロバスト性に大きな影響を与える
- 円弧状の足は大きければ大きいほどロバスト性が高まる
- 胴体は必ずしもロバスト性を改善すると言えない
- ある歩行速度に対して、歩行ロバスト性を最大するような股関節バネ剛性が存在する

歩行ロバスト性を最大するような股関節バネ剛性？

- 二つの斜面において、ロバスト性を最大にする股関節バネ剛性は違う
- もしバネ剛性の変更が出来れば、様々な斜面と歩行速度において歩行ロバスト性を最大化することが出来る
- 次は、可変剛性機械を説明する



1.0 deg 斜面

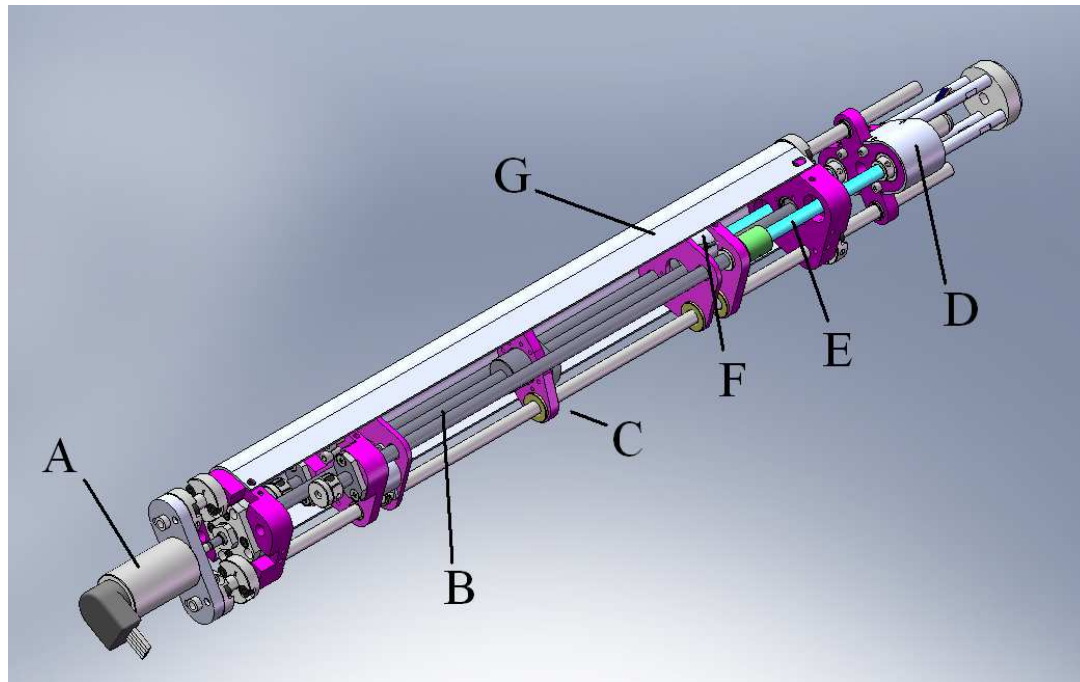


3.0 deg 斜面

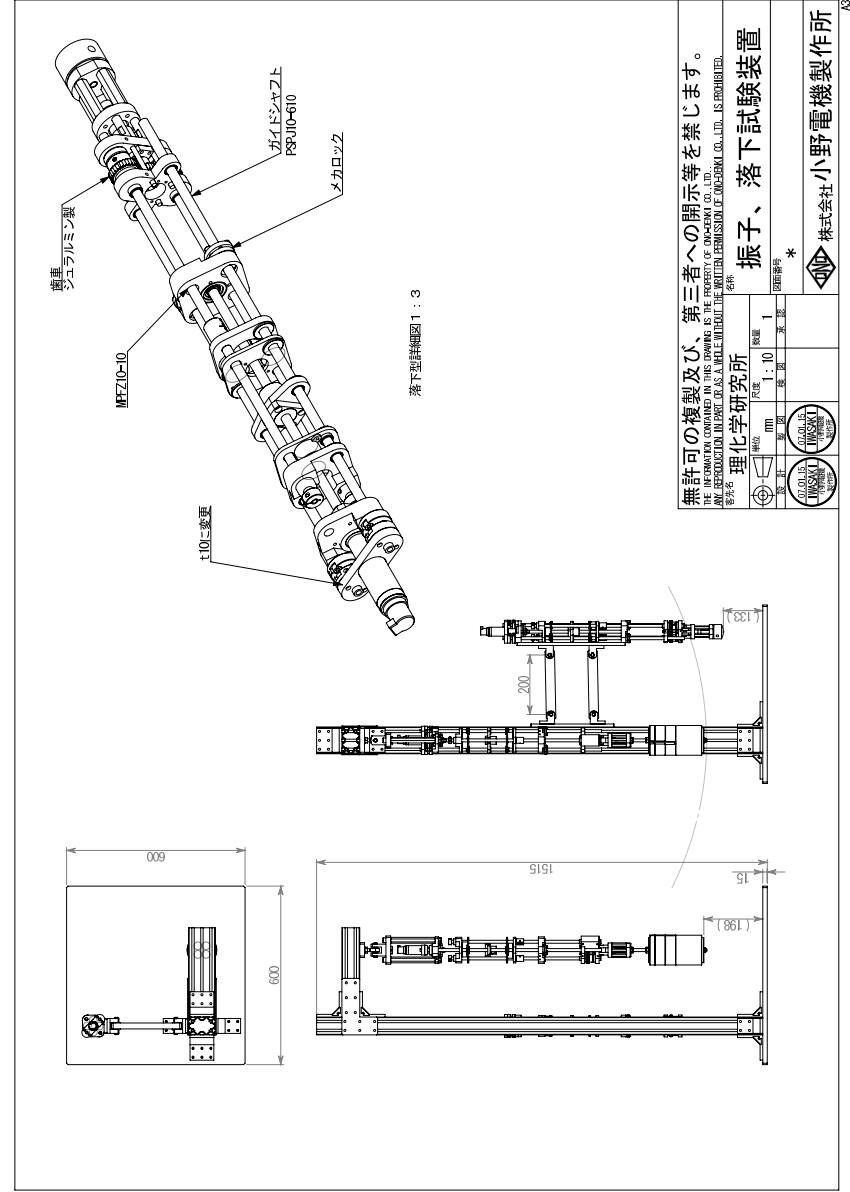
新しいアクチュエータの設計と製作:VSSEA

VSSEA: Variable Stiffness Series Elastic Actuator

- 機械固有のダイナミクスを打ち消さないアクチュエータ
- 二つの相対する二乗関係バネを用いることで、一つの線形可変バネと等しい効果が得られる
- モータは二つ：(A)は位置を制御し、(D)はバネ剛性を制御する



VSSEAの写真



まとめ

設計・実現・発表したこと：

- 二つの新しい歩行ロボスタ性の測り方： r_{IDR} と r_{EDR} 。制御有りとは制御無しにも適用出来る。後者は座標系に不変。
- ロバスト性を測る為の新しいシミュレーション。
- 新しい可変剛性アクチュエータ：
 - 機械的な固有ダイナミックスを打ち消さずに制御やエネルギーを加えられる
 - 環境や歩行速さにより、可変バネでロバスト性を最大するように適応出来る

今後の課題

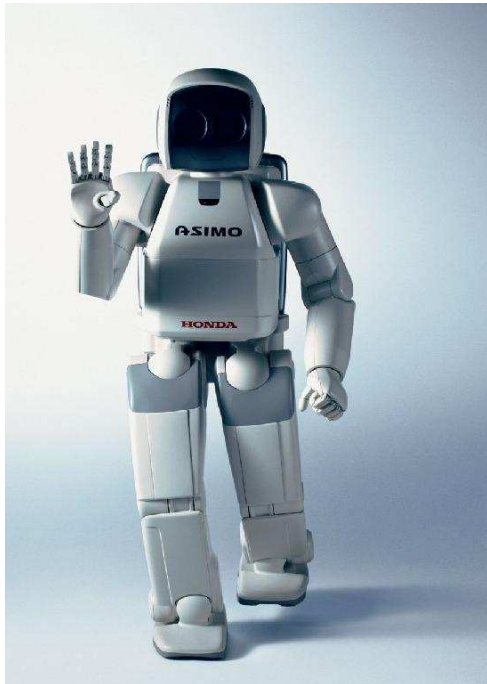
- ロバスト性の定義に基づくロボットの製作と制御。
- r_{IDR} と r_{EDR} のどちらが実際のロバスト性と一番よく相関することについての検討
- VSSEAの設計をより軽く、より摩擦の低いシステムへの改良
- マニホールド定理と数値的最適化方法を用いて制御システムの設計

質問

二足歩行ロボットの最新式は何なのか

アクチュエータイペーダンスの高い、軌道追従制御を用いるロボット

- 利点：一般的な方法、わかりやすい
- 欠点：軌道追従制御の拘束は厳し過ぎる為エネルギー効率が低い、衝突に弱い、危険、走れない。



Asimo (Honda)



HRP-2 (AIST)

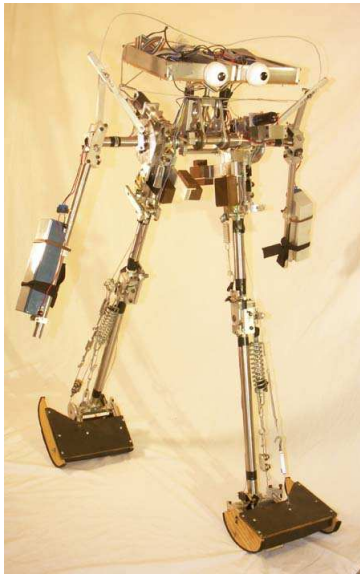


QRIO (Sony)

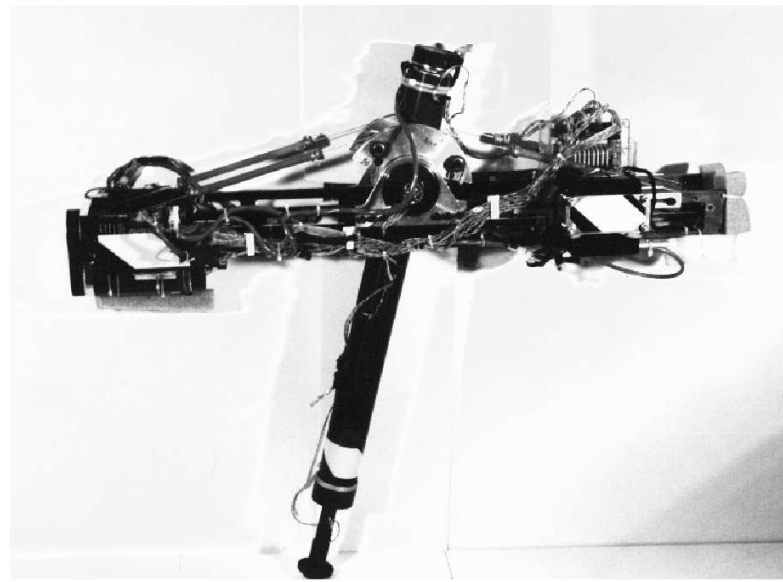
どのように最新式ロボットのパフォーマンスを越えられるのか

ロボットを受動歩行・走行の現象に基づけばよいと提案する

- 利点：エネルギー効率がよい、自然に見える動き、衝突を耐えられる、より安全
- 欠点：ロバスト性解析は困難、制御システムの設計は困難、アクチュエータを用いるのは困難（この問題を解決できるのか）



Cornell Biped



Monopod-II (McGill)



Denise (Delft U.)

受動歩行に基づいたロボットの効率はどのくらい

Cost of Transport: $c_t = \frac{\text{energy}}{\text{weight} \cdot \text{distance}}$

c_{et} はバッテリーあるいはmetabolicの消費したエネルギー, c_{mt} は機械的な仕事

Name	Mfg	c_{et}	c_{mt}	Passive-Dynamic?
Asimo	Honda	3.2	1.6	no
Denise	Delft	5.3	0.08	yes
Monopod II	McGill	0.22	-	yes
Cornell Biped	Cornell	0.20	0.055	yes
Human Walking	God	0.20	0.05	-
Dynamite	McGeer	-	0.04	yes

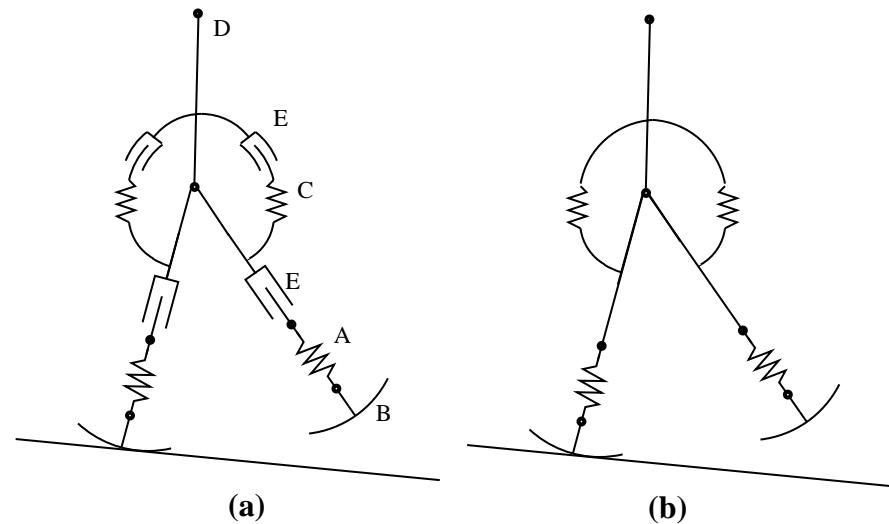
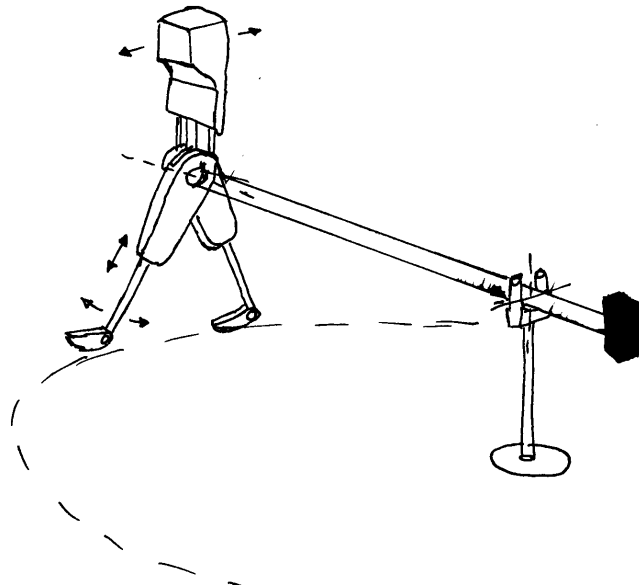
受動歩行なのに c_{et} が高くなった理由は技術関係の問題だと思われる

受動歩行の欠点に戻りましょう

- 受動歩行の機械的なロバスト性は r_{IDR} などを用いて計測できる
- しかし、現実的な制御とアクチュエータ設計条件を考慮しなければならない
- どのように受動歩行ロボットにアクチュエータを付加すればよいのか

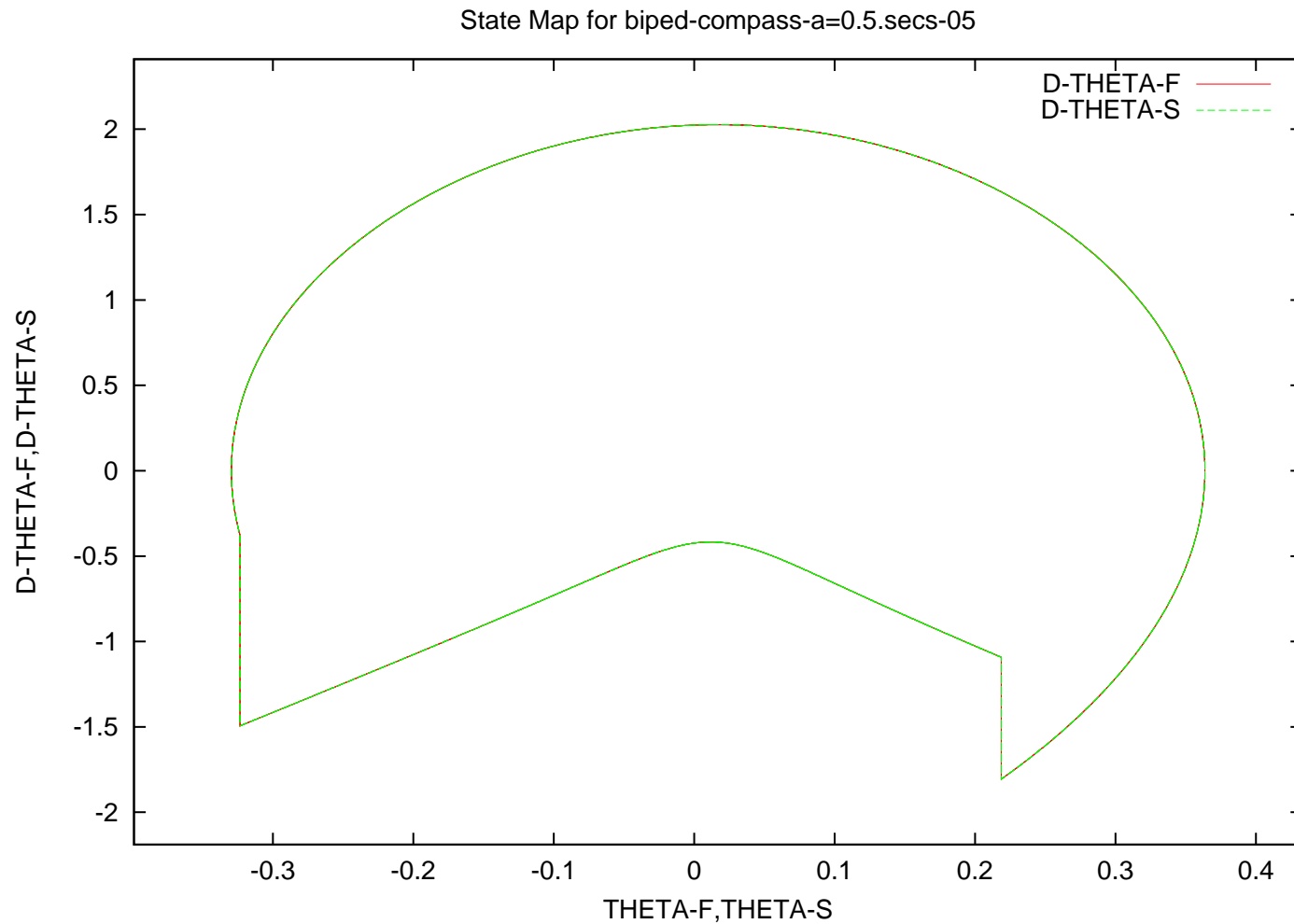
受動歩行に基づいた二足ロボットの設計概要

- モータをロックすれば、機械的な歩行ロバスト性を制御システム無しの状態でも検討出来る
- 可変バネの使用で、目的歩行速度に対してのロバスト性を最大出来る
- 機械的なロバスト性が充分あれば、制御複雑さが減る



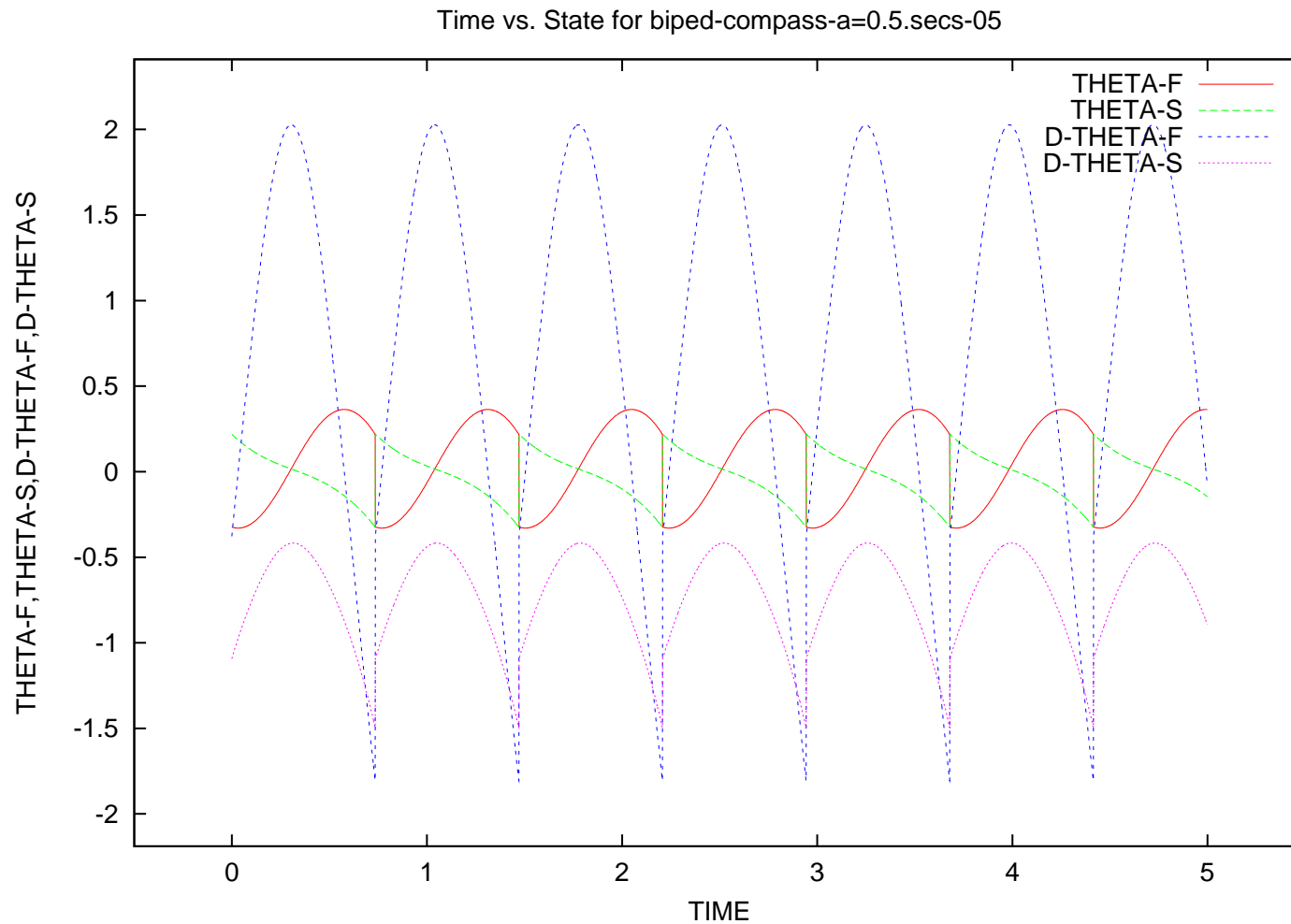
シミュレーション機能

- 自動的にリミットサイクルを導ける



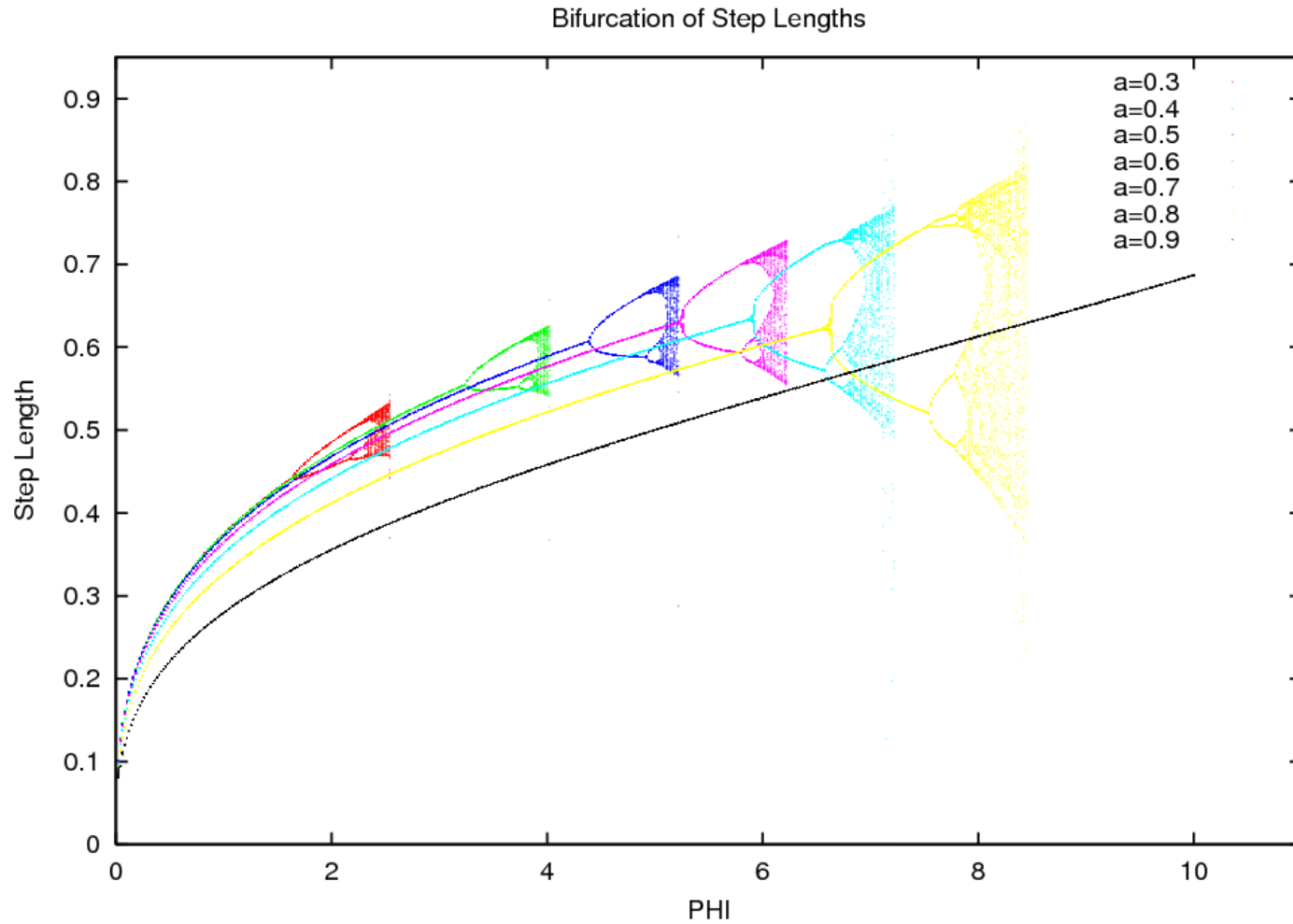
シミュレーション機能

- 自動適にプロット作れる



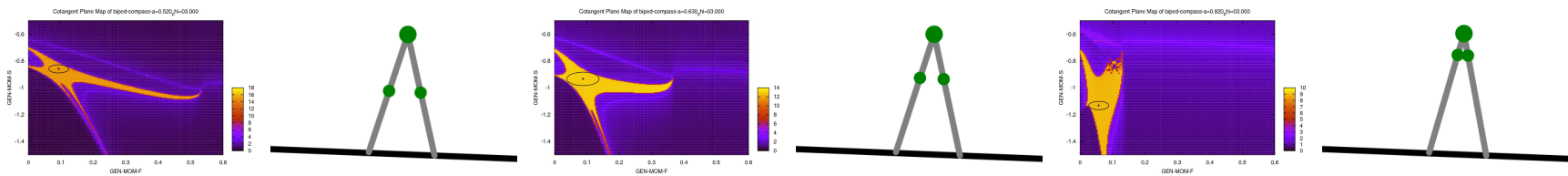
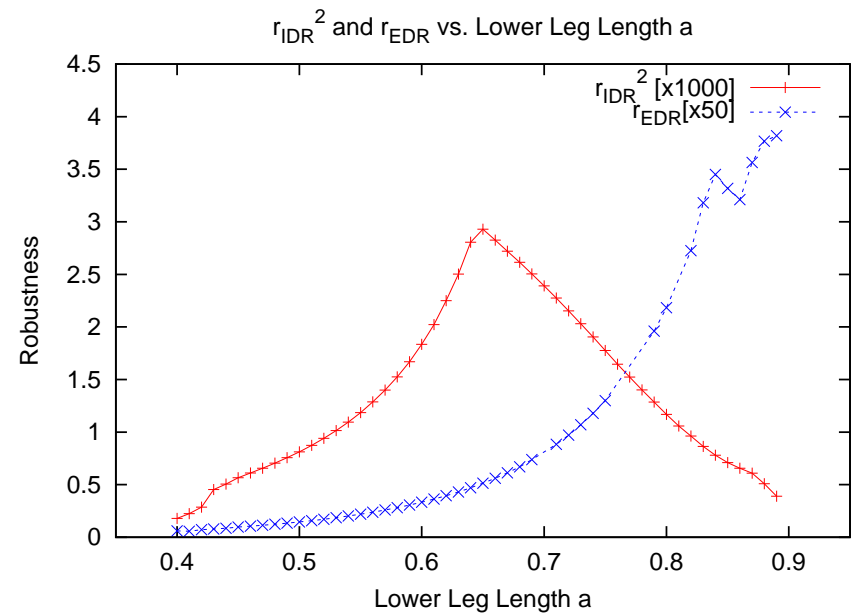
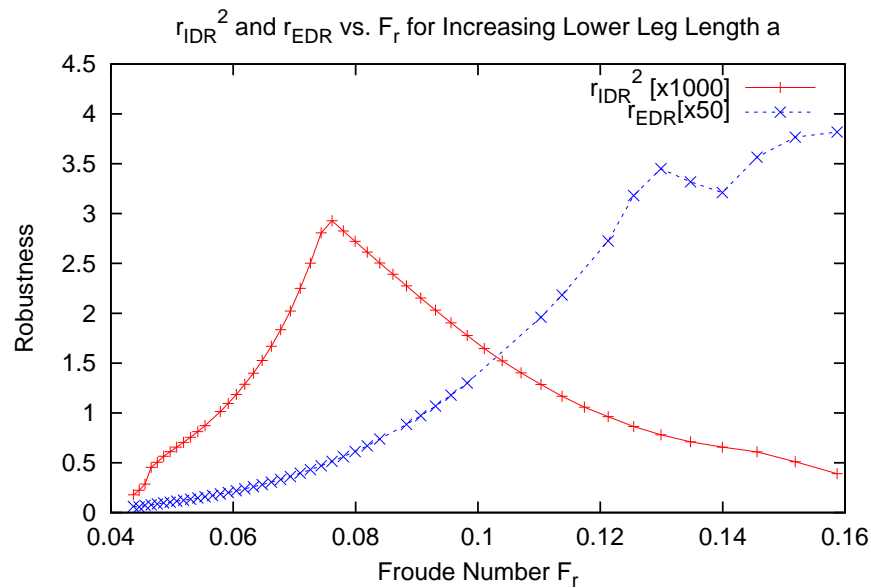
シミュレーション機能

● 例えは、歩幅の分岐



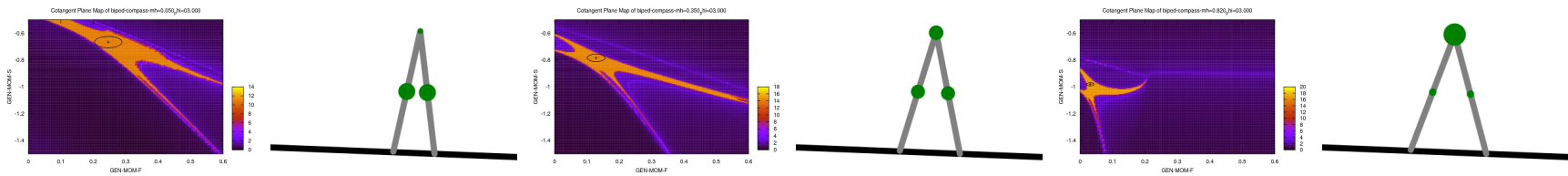
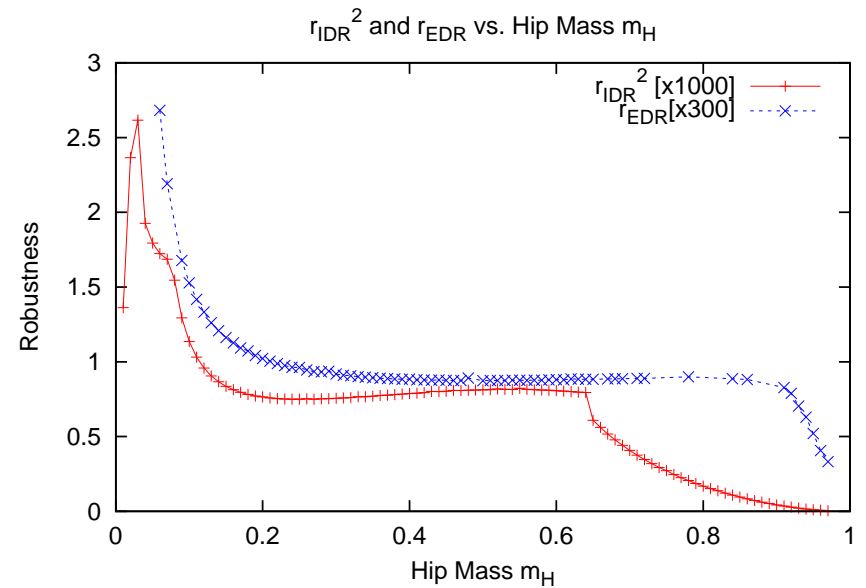
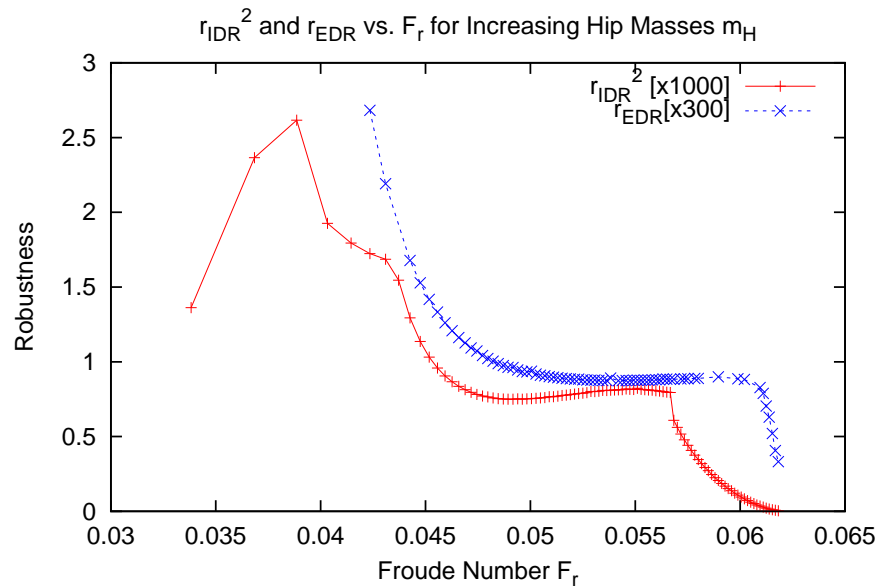
Effect of Varying Lower Leg Length

Greatly affects robustness. This is the only graph where r_{IDR} and r_{EDR} do not agree.



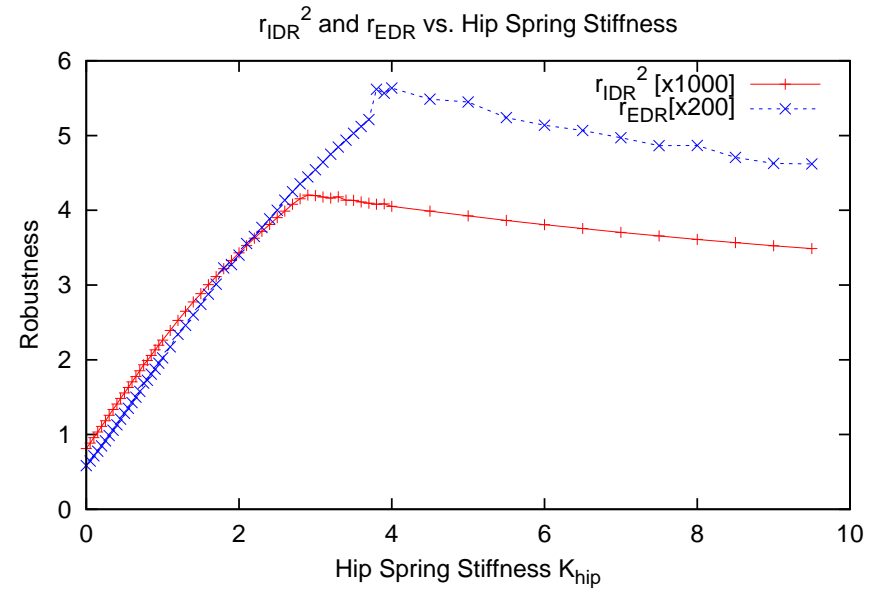
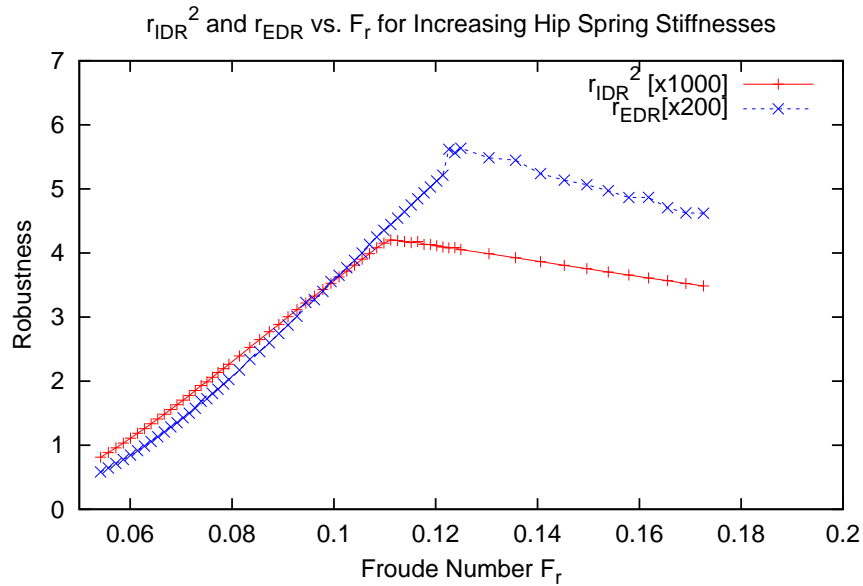
Effect of Mh

Little effect on robustness.



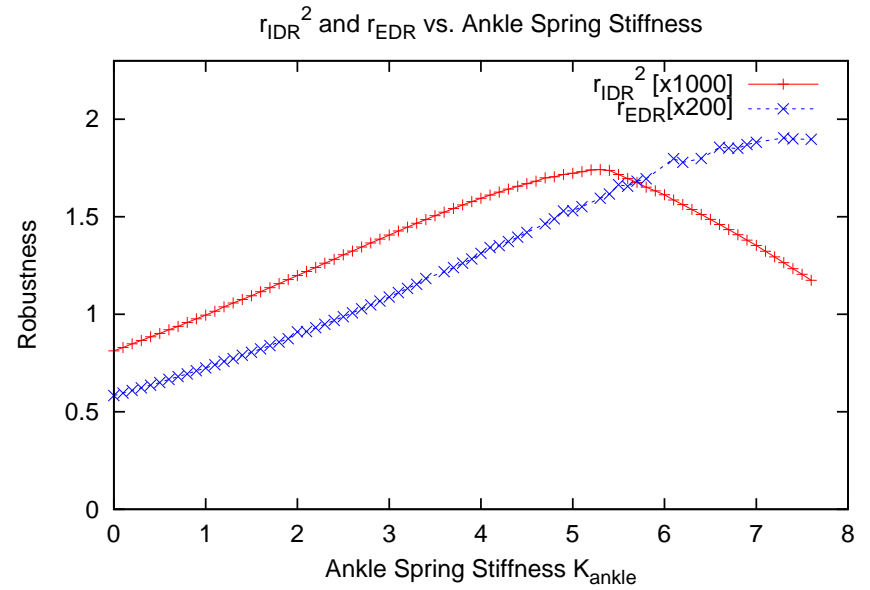
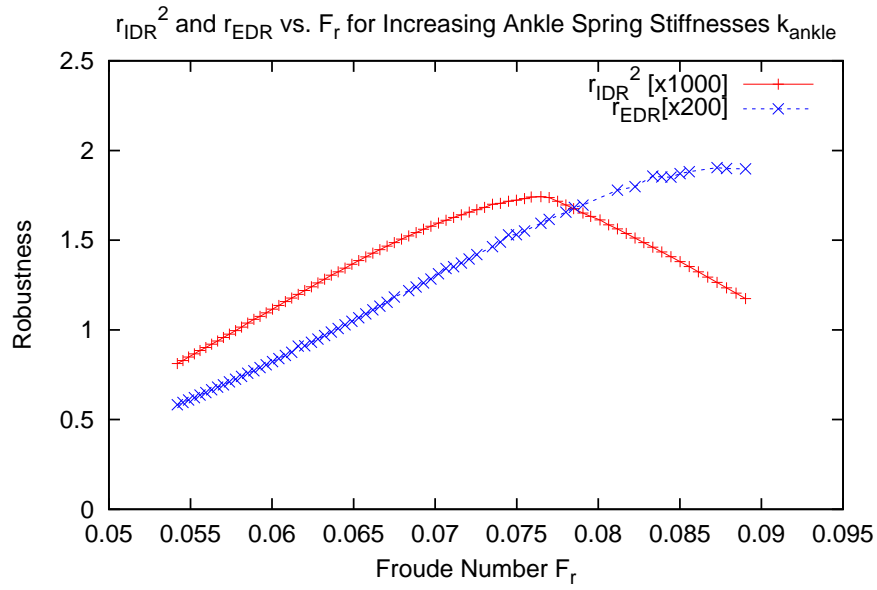
Effect of k_{hip}

Great effect on robustness, peaking behavior interesting.



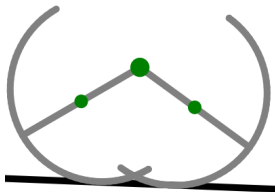
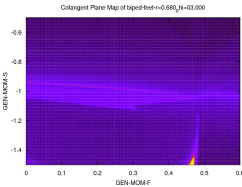
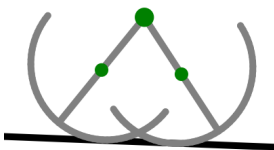
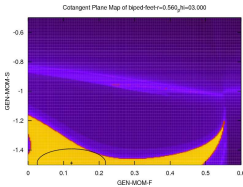
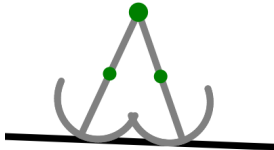
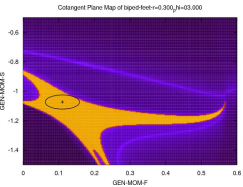
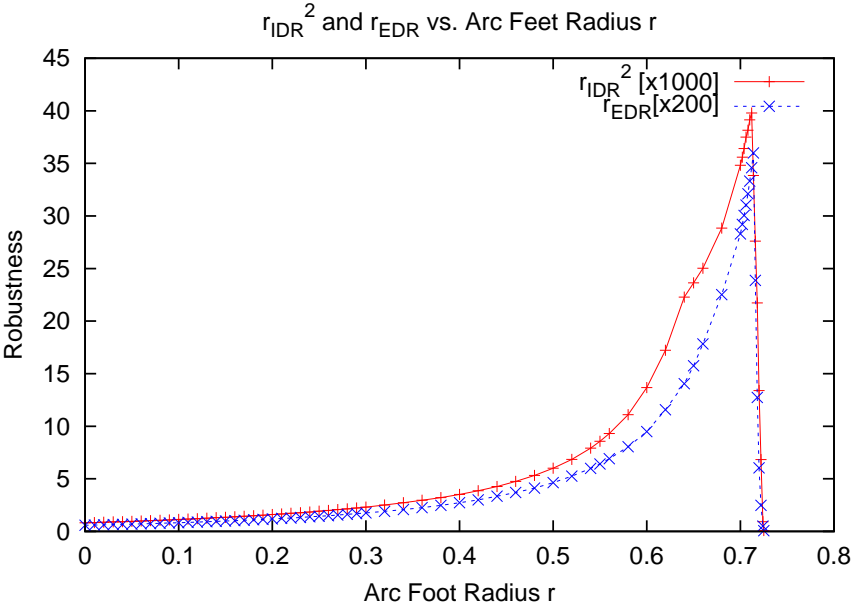
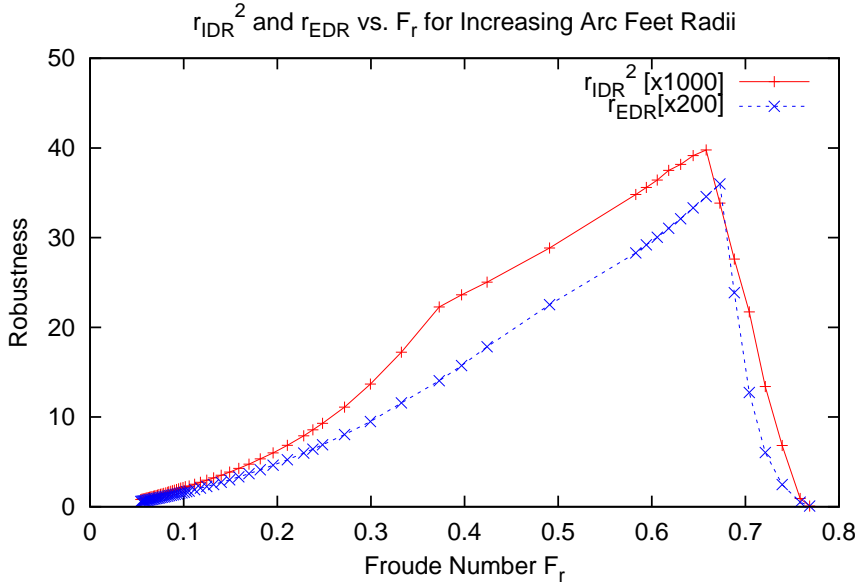
Effect of k_{ankle}

Slightly unphysical, but improves robustness



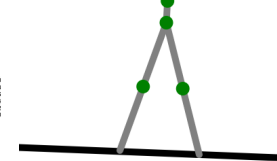
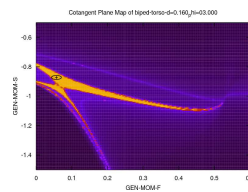
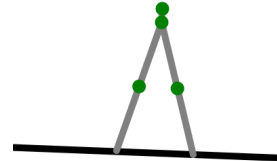
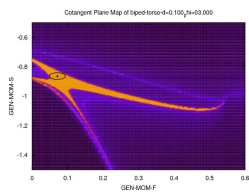
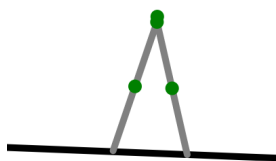
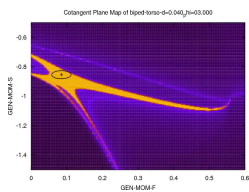
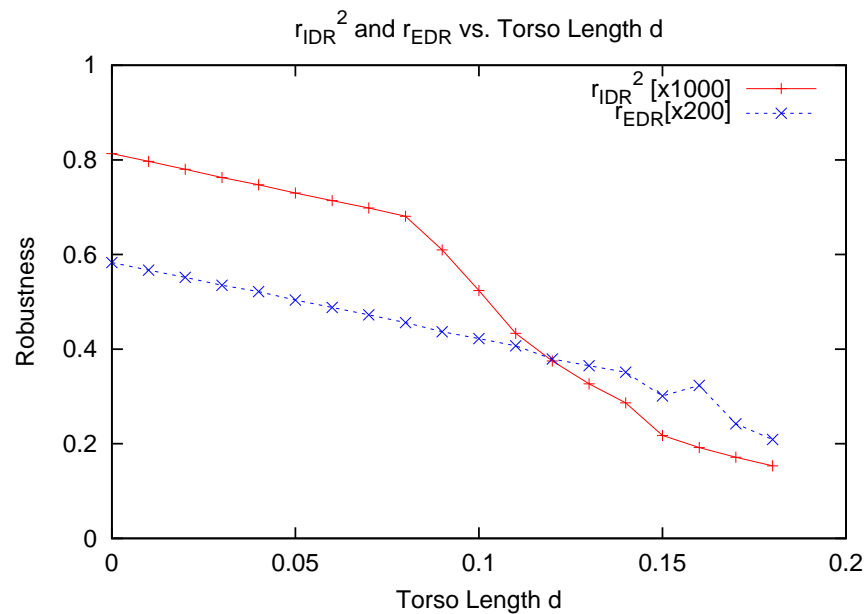
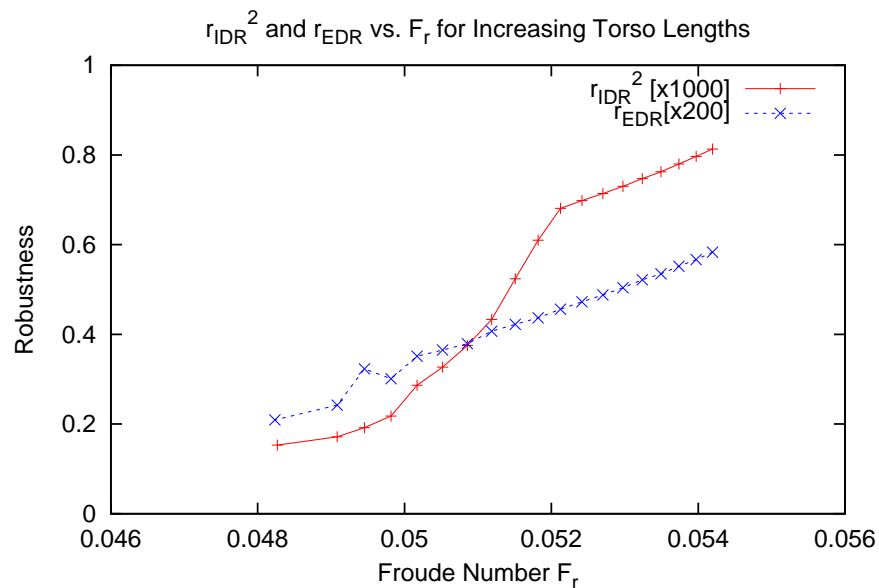
Effect of Arc Feet

Increasing arc radius improves speed and robustness



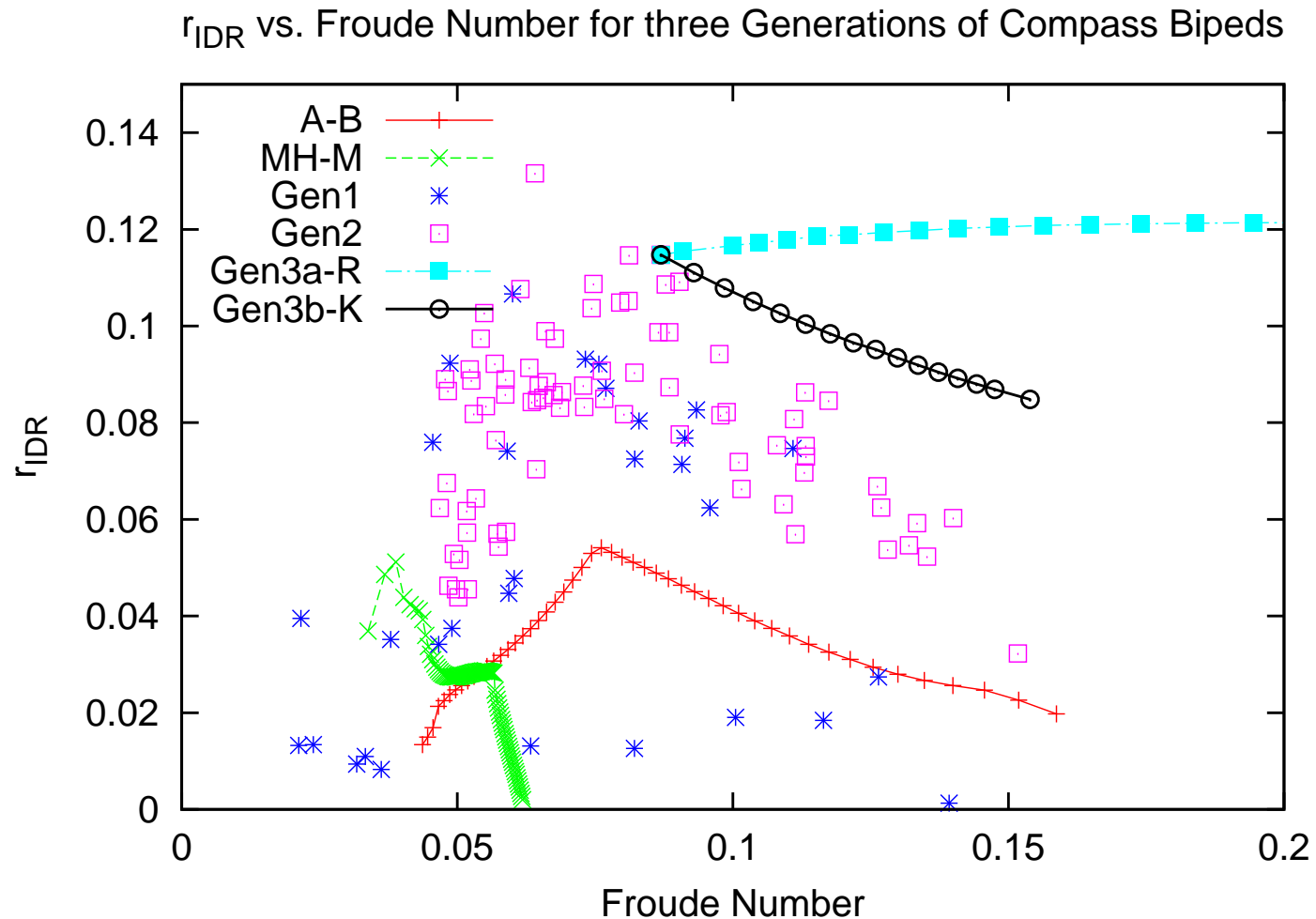
Effect of Torso

Adding a torso made robot less robust



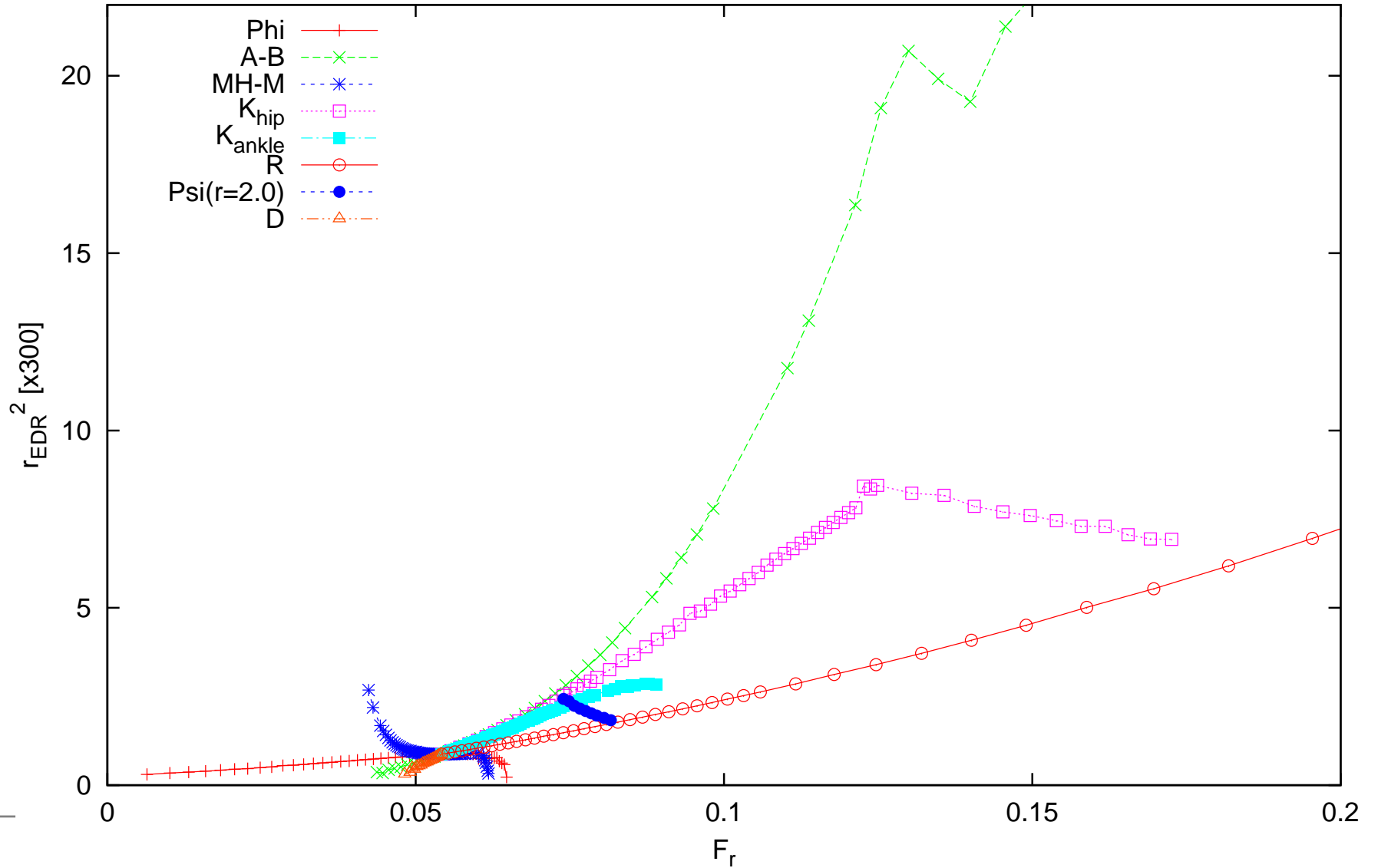
What about varying more than one parameter?

Let's pick some design parameters randomly and evolve a biped

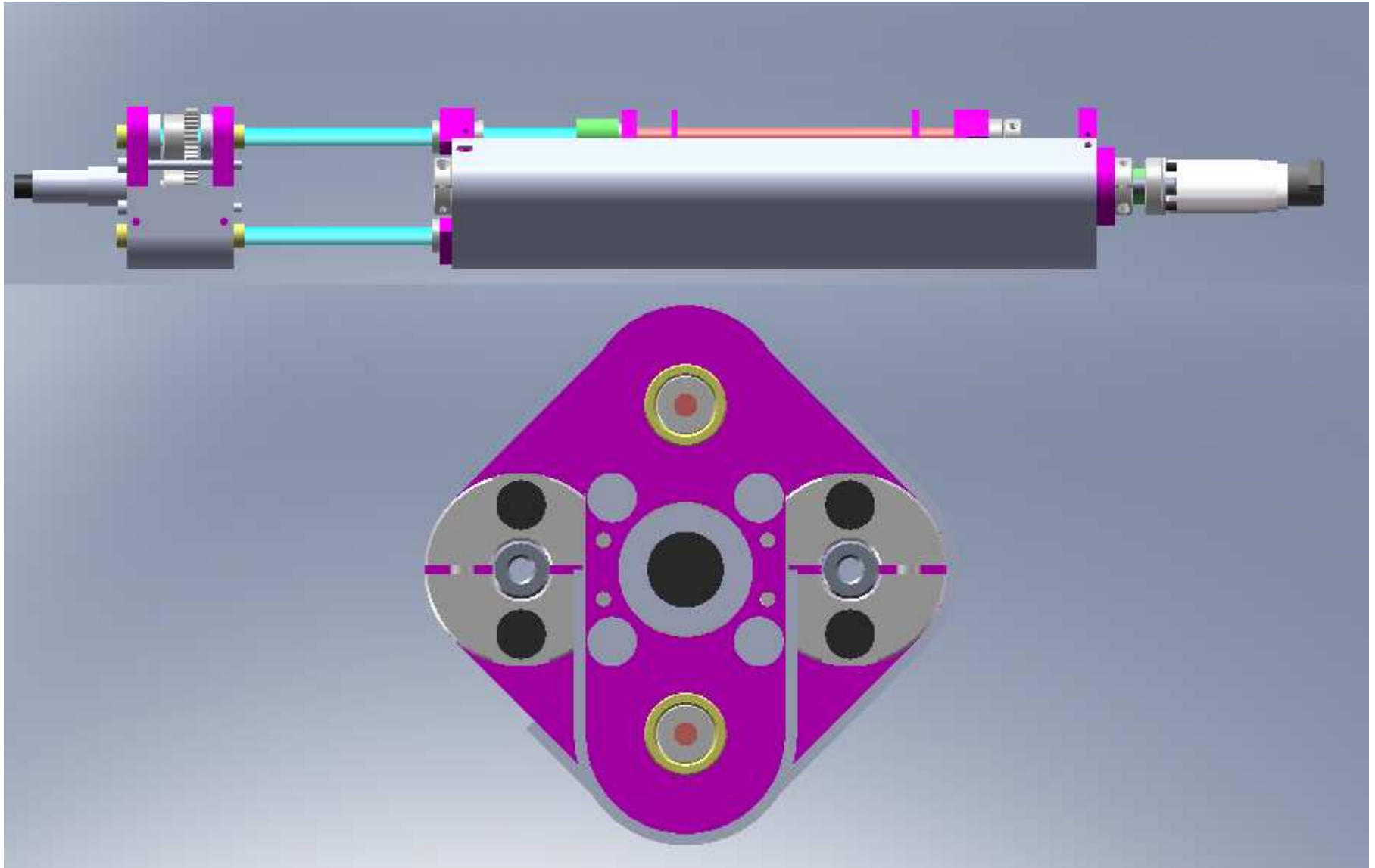


Summary of r_{EDR} Data

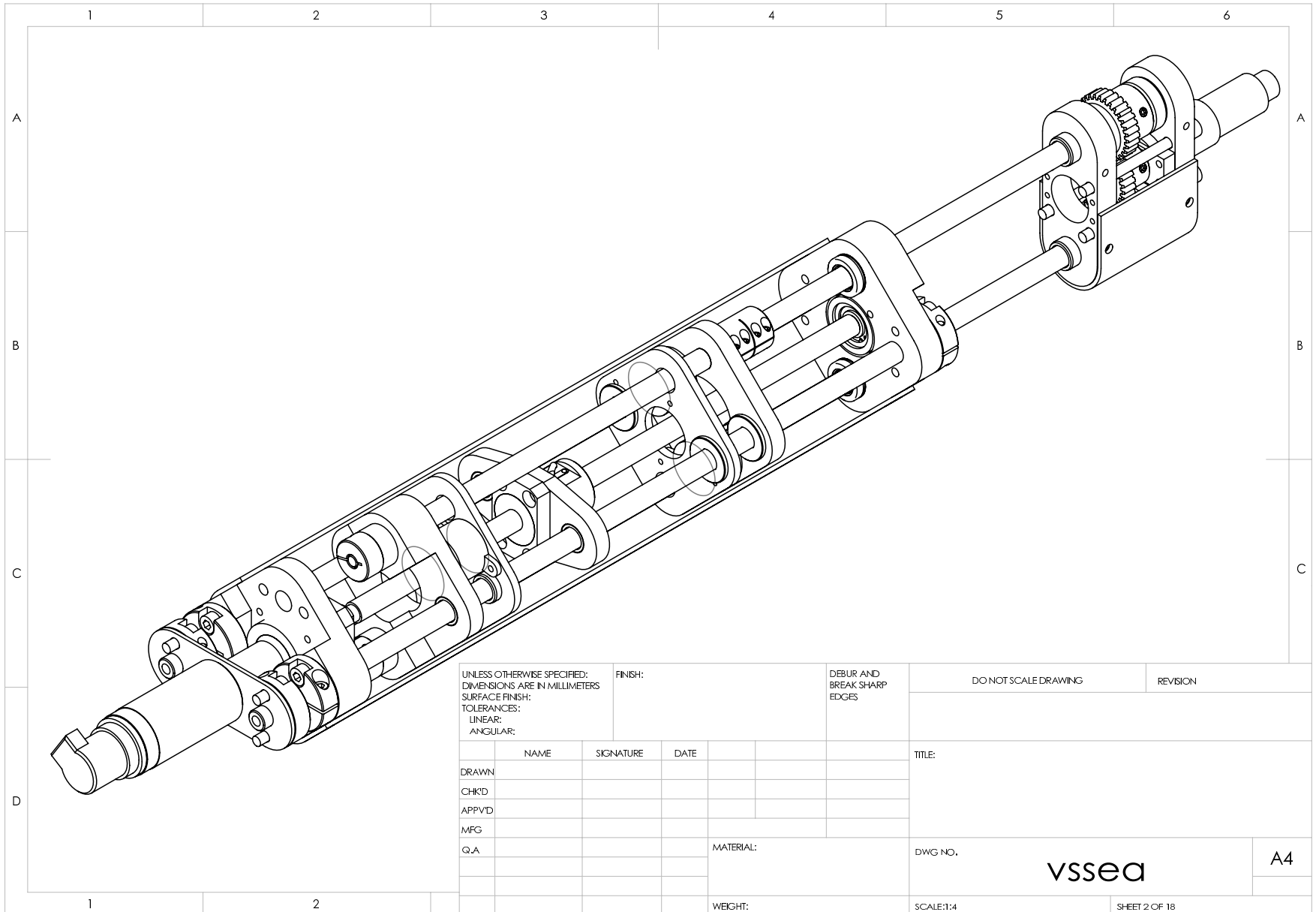
r_{EDR} vs. Froude Number for many types of robots



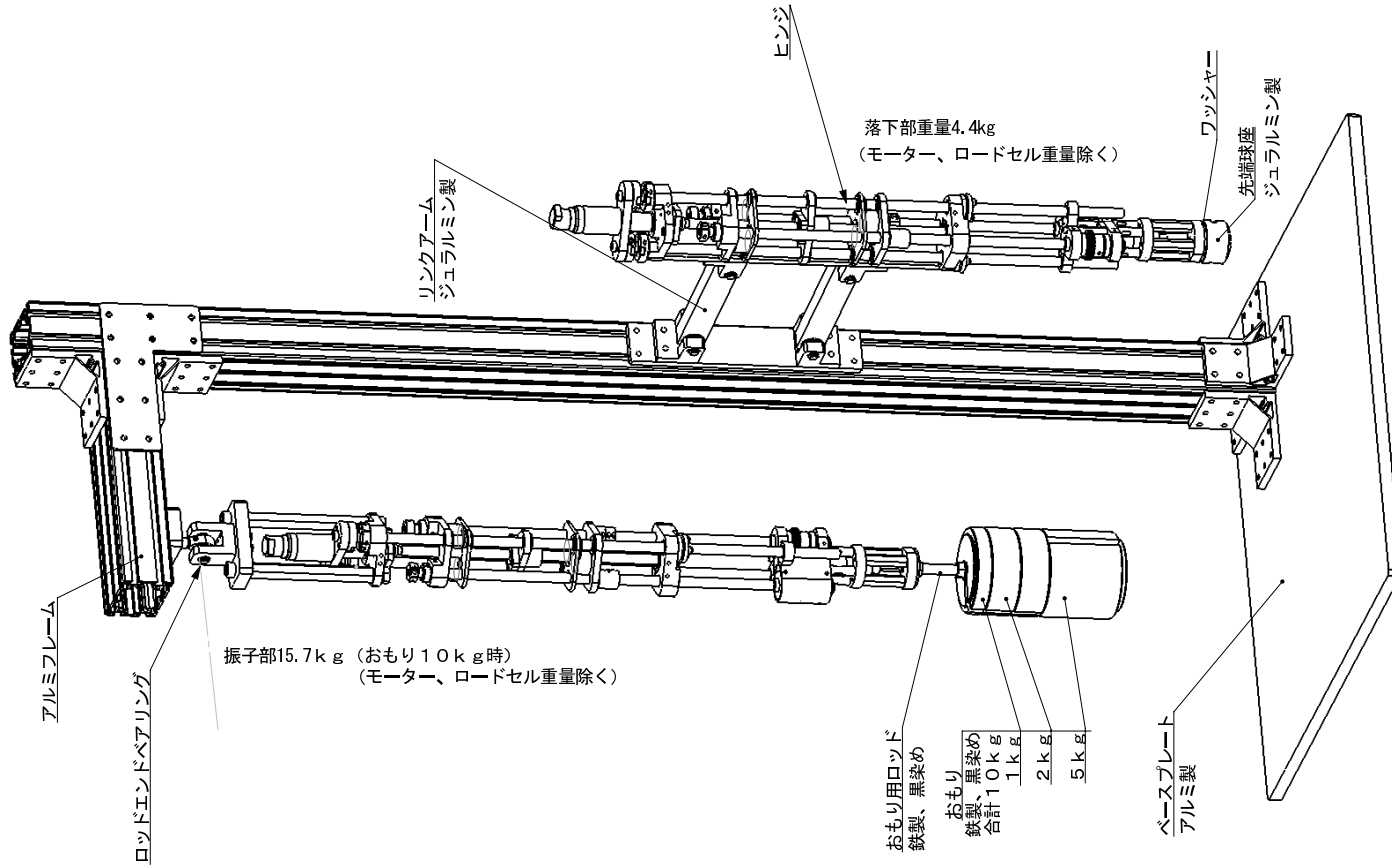
VSSEA schematics



VSSEA schematics



VSSEA schematics



無許可の複製及び、第三者への開示等を禁じます。

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF ONO-DENKI CO., LTD.
ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF ONO-DENKI CO., LTD. IS PROHIBITED.

客先名 理化学研究所				名称 振子、落下試験装置	
	単位 mm	尺度 1:1	数量 1	図面番号	
設計	製図	検図	承認	*	
				株式会社 小野電機製作所	

● Kineticエネルギーの分岐

