

剛体物理エンジンの本質と活かし方

花岡優介 須佐育弥(電気通信大学) 長谷川晶一(東京工業大学)

概要

物理エンジン 運動方程式と拘束条件を満たすように剛体を動かしたりリアルな動きを作る
 拘束条件を式で表し連立させると線形相補性問題となり高速に計算できる
 ばねダンパ・弾塑性変形・関節可動域拘束をLCPに帰着させ物理エンジンへの組み込みを行う

線形相補性問題(LCP)

物理エンジンでは速度と拘束力の関係式を線形相補性問題に帰着させる

$$w = A\lambda + b \quad (1)$$

w : 速度
 λ : 拘束力

接触による拘束(相補性拘束) A, b : 既知の行列, ベクトル

$$\lambda \geq 0, w \geq 0, \lambda w = 0$$

関節の拘束(等式拘束)

$$w = 0$$

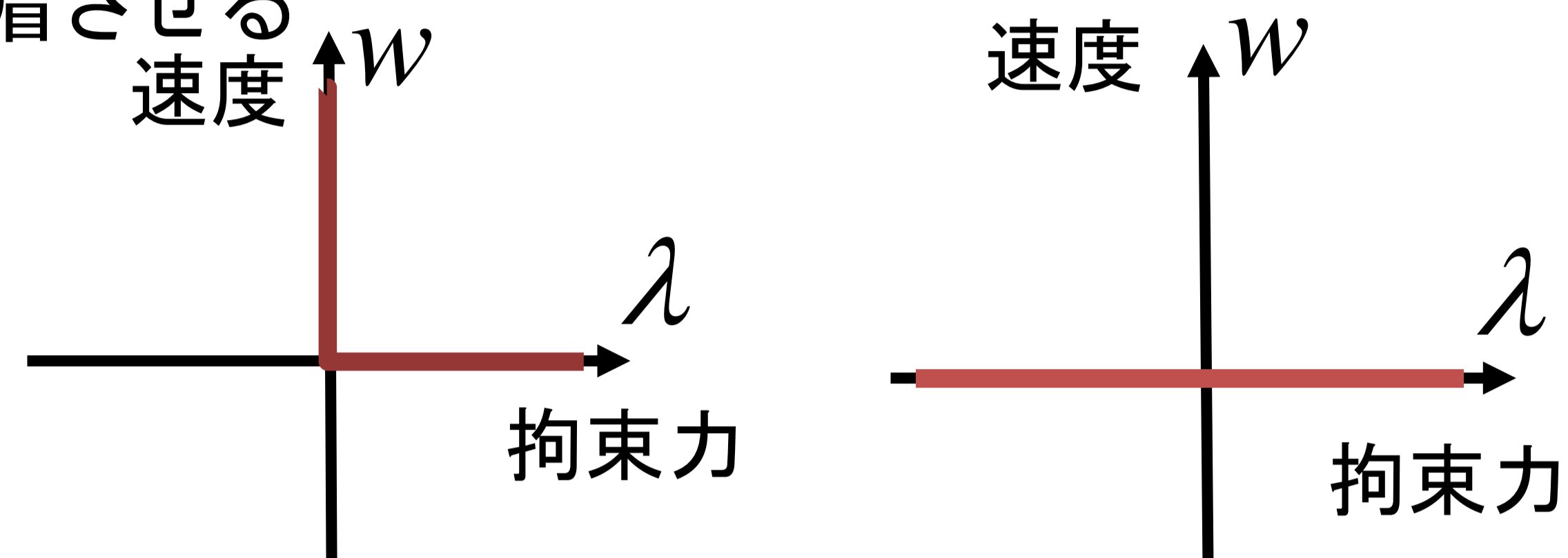


図1 相補性拘束

等式拘束

安定なばねダンパ 田崎ら[2006]

現在の姿勢からばねダンパの拘束力を計算すると誤差により発散しやすい(図2前進積分)
 拘束力の計算に後退積分を用いることで安定なシミュレーションができる
 このとき拘束力は次のように表せる。

$$\lambda_s[t] = -Kq_s[t+1] - Dw_s[t+1]$$

$$\approx -K(q_s[t] + w_s[t+1]dt) - Dw_s[t+1]$$

$$w_s[t+1] = -(D + Kdt)^{-1} \lambda_s[t] - (D + Kdt)^{-1} Kq_s[t]$$

(1)式のA,bに下線部を取り込むことでLCPとなる

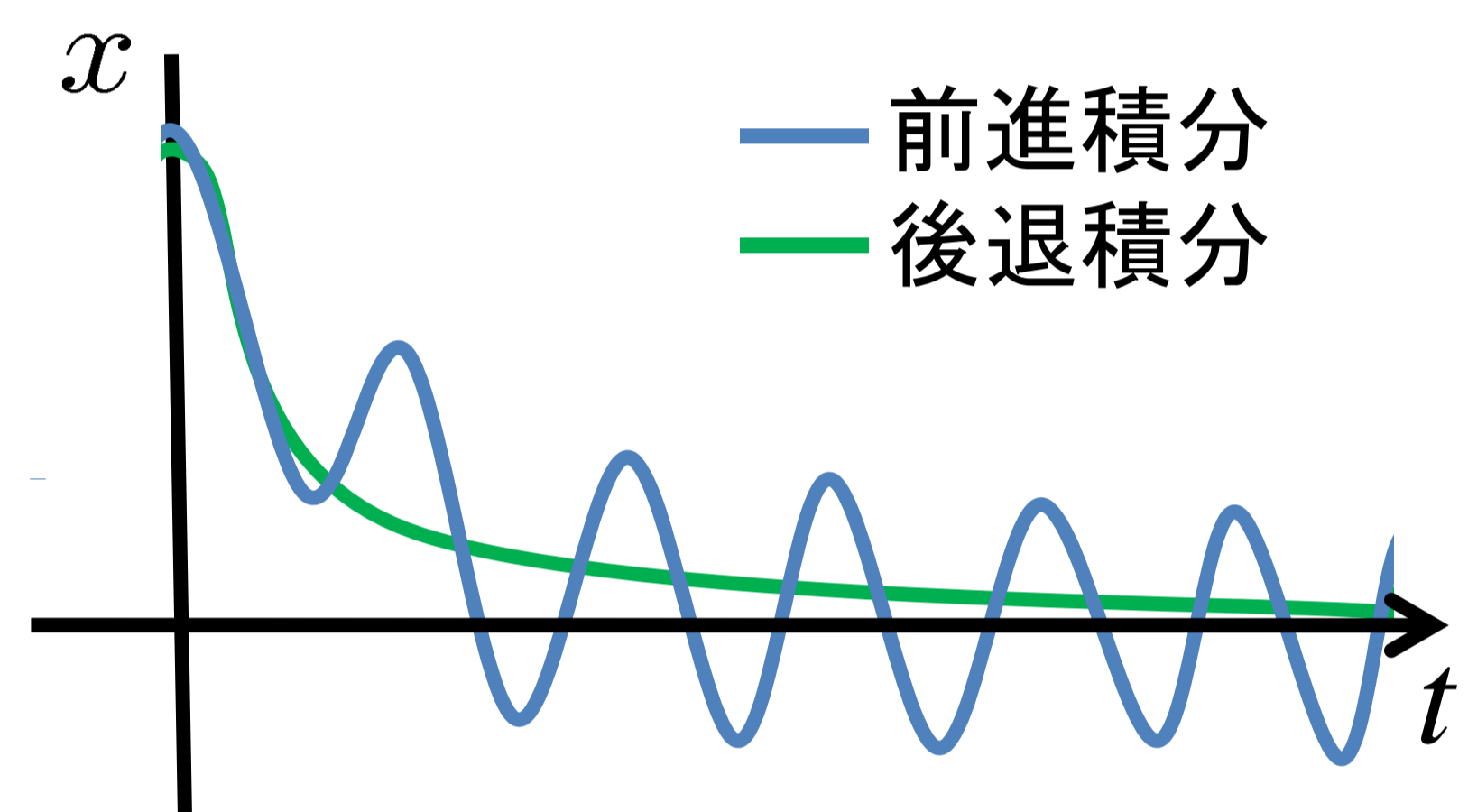


図2 ばねダンパの変位例

弾塑性変形 松永ら[2009]

SSD(skeletal-subspace deformation)の関節部に弾塑性変形モデルにすることで、
 計算コストを抑えて弾塑性変形シミュレーションを行うことができる
 弾塑性変形はばねダンパモデルと三要素モデルを切り替えることで表せる
 拘束力によってモデルの切り替えを行う

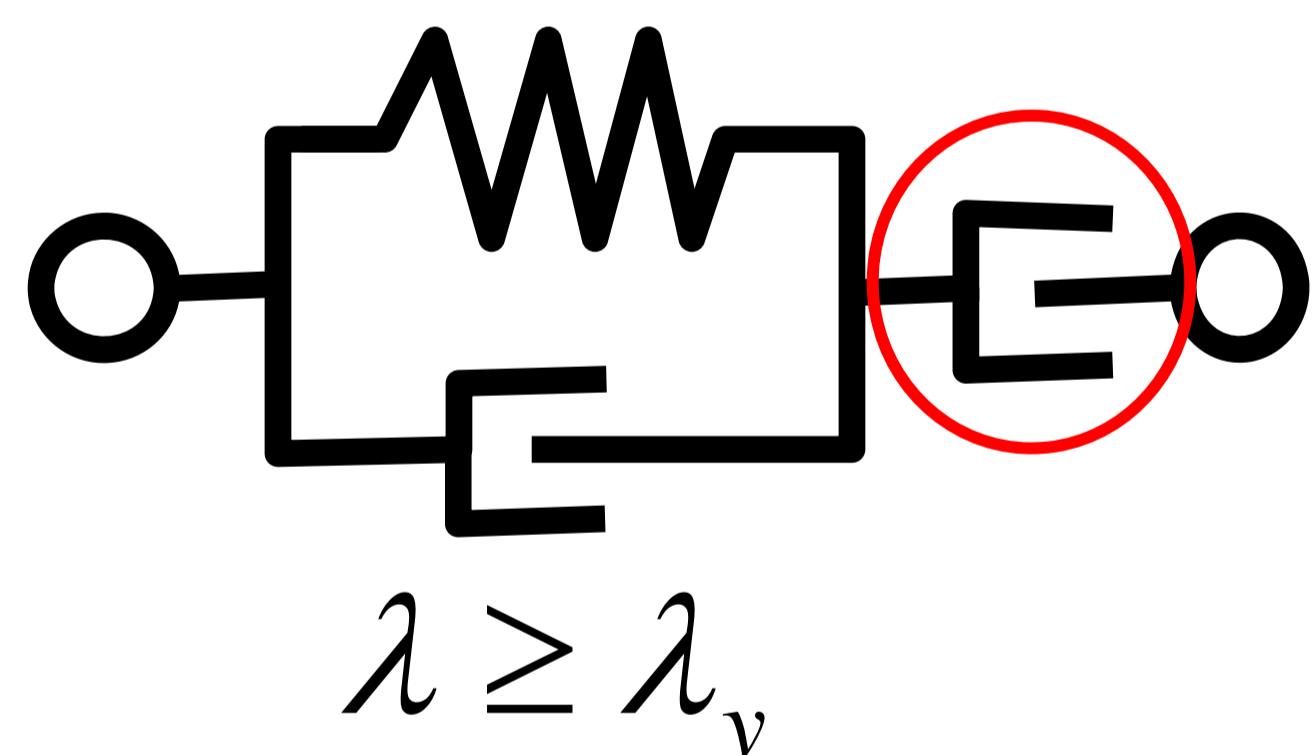
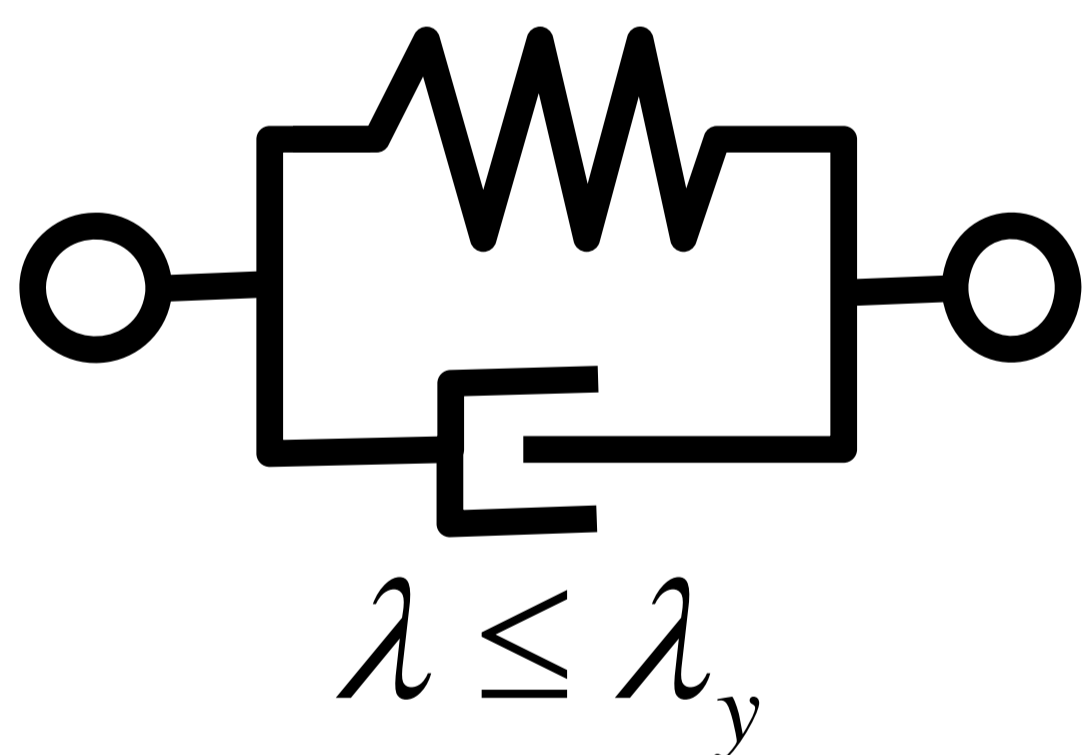


図3 ばねダンパモデル

三要素モデル

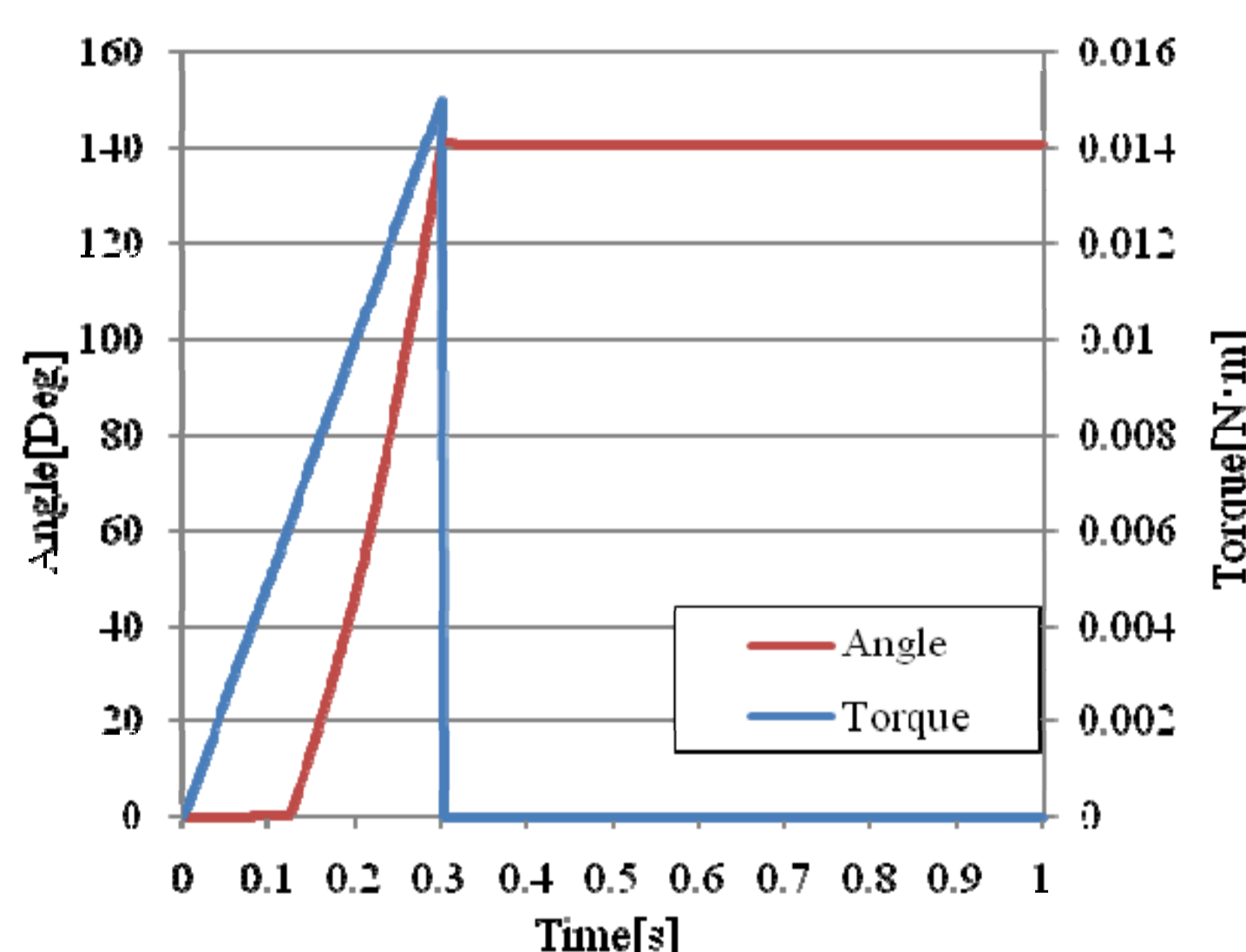


図4 弾塑性変形の挙動例

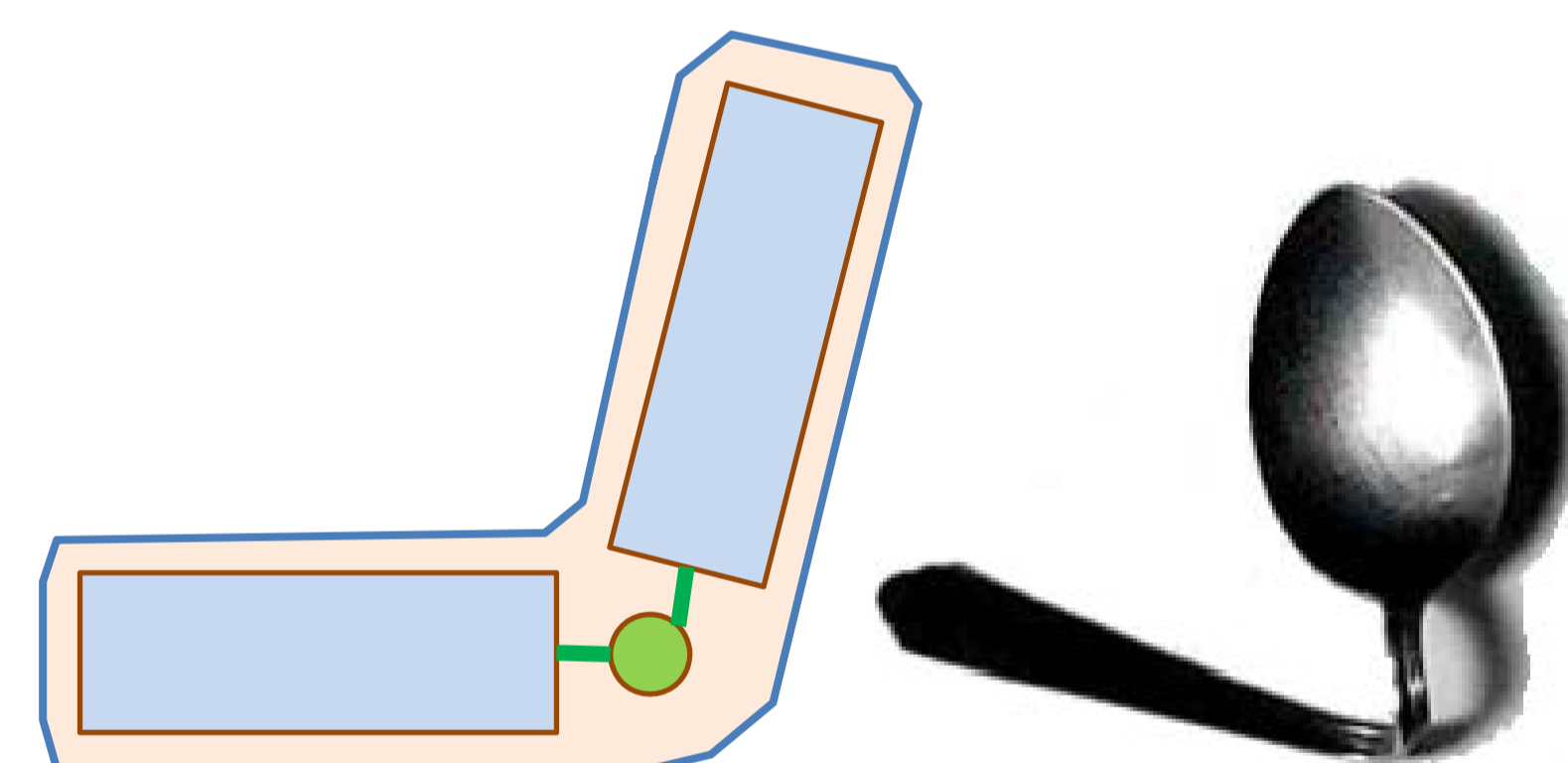


図5 SSDモデルでの変形例

三要素モデルも式変形をすることでばねダンパモデルのようにLCPに組み込める

関節可動域拘束

関節可動域拘束は拘束軸ごとの相補性拘束として表すことができる
 生物は複雑な可動域制約をもっている
 物理エンジンでは座標変換をしてLCPに帰着する

$$M\dot{u} = f_c + f_e$$

$$Ju[t+1] = JM^{-1}J^T\lambda + JM^{-1}f_e + Ju[t]$$

$$w = A\lambda + b$$

M : 慣性行列
 u : 速度
 f_e : 外力
 f_c : 拘束力
 J : ヤコビアン
 λ : 拘束力

ヤコビアンを変形すると拘束軸を任意の方向にできる
 拘束軸ごとにLCPを用いることで可動域制約を与えられる

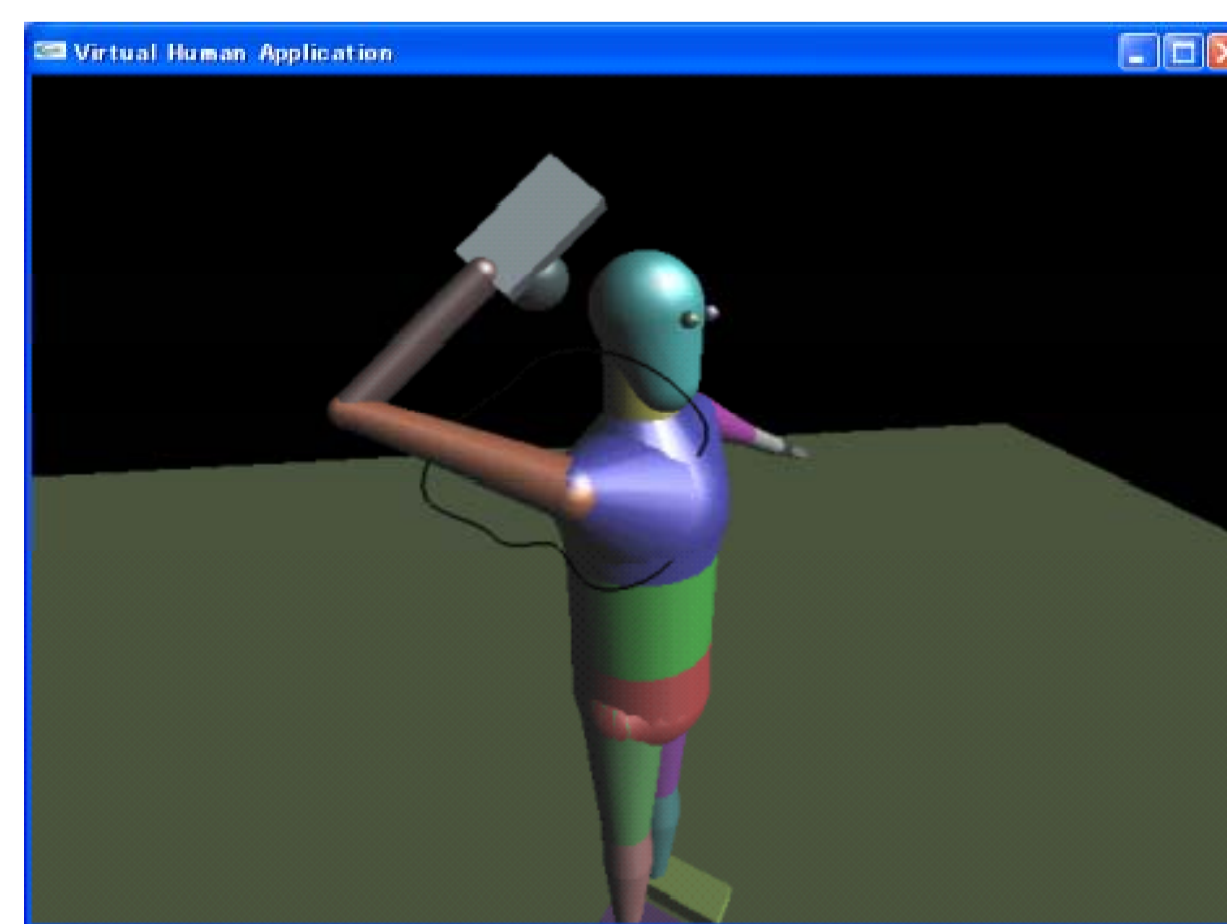


図6 キャラクターの関節

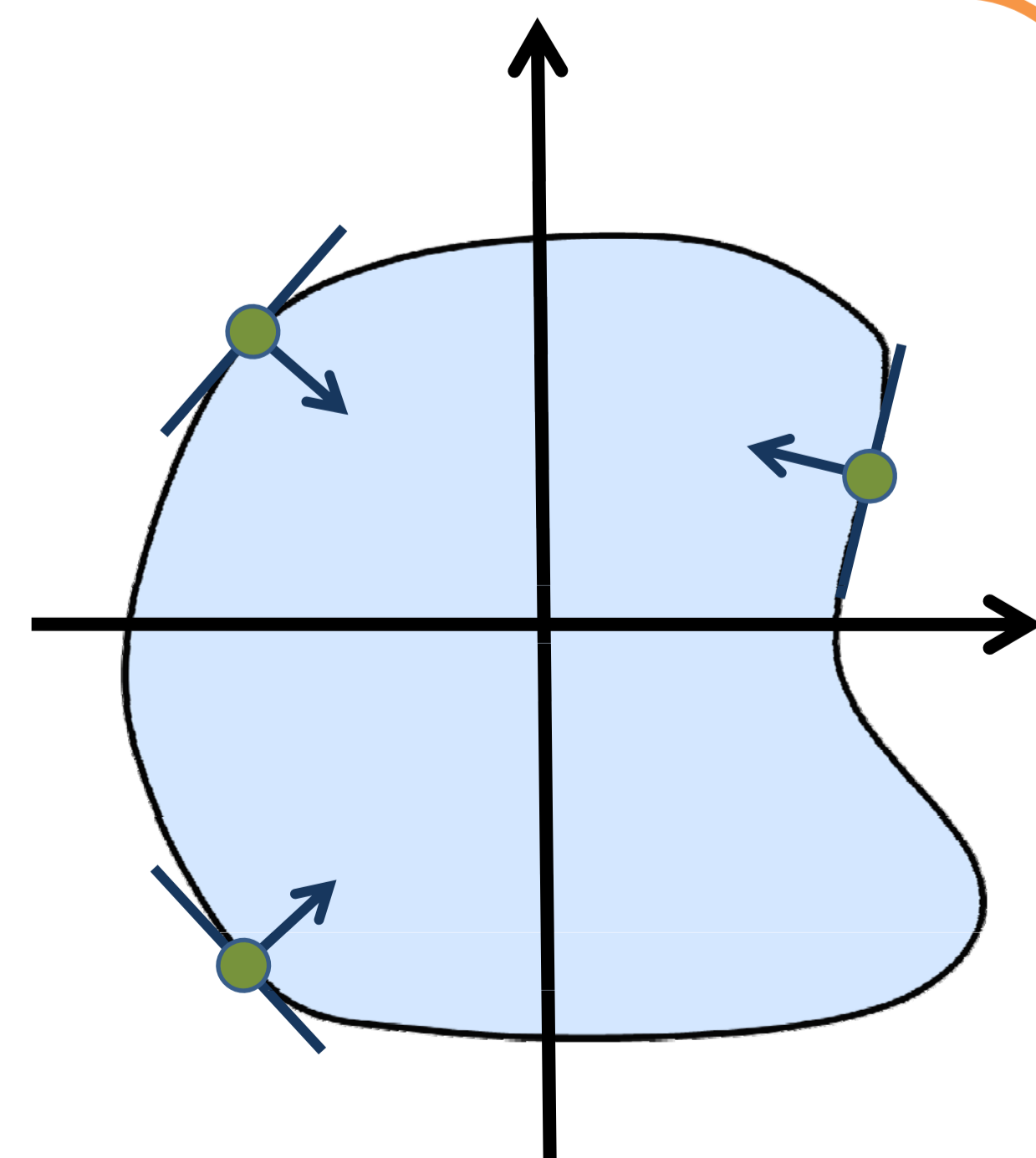


図7 関節可動域曲線

参考文献

- D. Baraff. Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies.1989.
- 田崎勇一, 長谷川晶一. 拘束法の動力学シミュレータのための安定なバネダンパモデル. 情報処理学会研究報告. グラフィクスとCAD 研究会報告, Vol.2006, No.91(20060817) pp.55-60 版, 2006.
- 松永昇悟, 長谷川晶一. 力覚インタラクションのための大域的な弾塑性変形手法. 日本バーチャルリアリティ学会第14回大会論文集, 2009 9 pp.1C4-4.

- 今回使用したシミュレータのソースコード公開しています。今回の発表に参考にさせていただいた物理シミュレータについての資料もありますのでこちらも参考にしてください
- 研究室のホームページです。研究発表の原稿なども置いてありますのでこちらもご覧ください。

<http://springhead.info/wiki/>

<http://haselab.net/>