

高速スローイング動作におけるリリース制御の解析

○ 妹尾 拓 (東大) 並木 明夫 (千葉大) 石川 正俊 (東大)

Analysis of Release Control in High-speed Throwing Motion

○ Taku Senoo (Univ. of Tokyo) Akio Namiki (Chiba University) Masatoshi Ishikawa (Univ. of Tokyo)

Abstract: High-speed manipulation has great potential to produce new robotic skills utilizing the feature of high-speed motion. Based on the concept, we had achieved high-speed throwing motion using a hand-arm system as an example. In this paper more precise contact model which contrasts with previous one is proposed to improve the success rate. The elasticity is introduced into the contact model. In addition a release method for robust control is analyzed.

Key Words: *high-speed manipulation, throwing motion, elastic contact*

1 はじめに

近年、機械システムの速度限界を目標とした高速マニピュレーションシステムが開発されている [1]。また様々な高速マニピュレーションが実現され [2, 3]、速さを利用するマニピュレーションは従来の運動原理とは異なった新しいロボット技能を生み出す可能性を示唆している。

そこで我々は高速ハンドアームシステムを用いて Fig.1 のような投球動作を実現してきた [4, 5]。しかし、指先とボールを剛体と仮定した接触モデルに基づいて投球方向の制御を行っていた。そこで本稿では弾性要素を導入した精密なリリースモデルに改良し、ボールをロバストにコントロールするための投球方法について解析した。

2 投球動作

ここでは弾性要素をもったボールと、剛体の指リンクとの接触を考える。そして、ボールをリリースするために指を加速させたときの運動方程式を導出する。

2.1 剛体指と弾性ボールの接触モデル

Fig.2 のようにボールを 2 本指で支えてリリースをおこなう [4]。簡略化のため、2 本指が存在する平面全体にボールが接触していると仮定して考える。

ボール内部に等方的な弾性要素が放射状に配置された Fig.3(a) のモデルを採用する。ボールの半径を a 、ヤング率を E 、変形による接触の断面積を dS とすると、バネ定数は $E dS/a$ と表される。

ボールの変形の様子を Fig.3(b) に示す。指リンクに対して接線方向は左右対称に収縮するため、接線力は全体として加わらないとする。

$$F_{tangent} = 0 \quad (1)$$

一方、法線方向の力は断面積に加わる力を積分すること

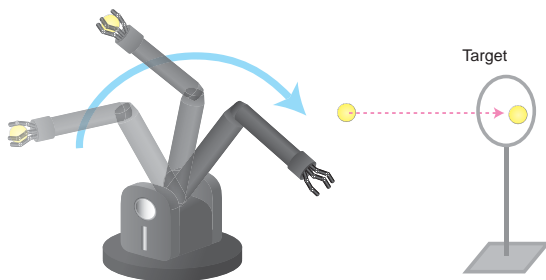


Fig. 1 Throwing motion using a hand-arm system

で得られる。

$$F_{normal} = \int E dS/a = \pi E(1 - \frac{d}{a})d^2 \quad (2)$$

ここで、 d はボールの最大変位である。

2.2 リリースの運動方程式

指リンクに固定した座標系を Σ_E とする。この座標系が、基準座標系 Σ_O に対して並進加速度 α_0 、角速度 ω_0 で動いているときの運動方程式は次式となる。

$$m\ddot{\mathbf{r}}' = \mathbf{F}' + m\mathbf{g}' - m(\alpha_0' + \dot{\omega}_0' \times \mathbf{r}') + 2m\dot{\mathbf{r}}' \times \omega_0' + m(\omega_0' \times \mathbf{r}') \times \omega_0' \quad (3)$$

ここで m はボールの質量、 \mathbf{r} はボールの位置、 \mathbf{F} はボールに加わる力、 \mathbf{g} は重力加速度、添え字' は座標系 Σ_E で記述されていることを表す。

ここで、投球する指リンクの接線方向に x 軸を、投球する 2 本指が存在する平面に垂直な方向に y 軸を設定する。またボールは指上を滑らずに指リンクに沿って転がると仮定する。このとき、ボールが指からリリースされるまで z 軸方向にボールは動かない。ボールの変位量も半径に対して微小とすれば、以下の条件が成立する。

$$y' = \dot{y}' = 0, \quad z' = \dot{z}' = 0 \quad (4)$$

式(1)より弾性要素に起因する接線力は加わらないため、指リンクに沿ったボールの転がり運動は次式で記述できる。

$$\ddot{x}' = \frac{5}{7} \{-\alpha_{0x}' + g_x' + (\omega_{0y}'^2 + \omega_{0z}'^2)x'\} \quad (5)$$

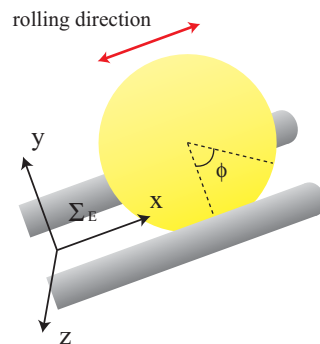


Fig. 2 Contact coordinate system

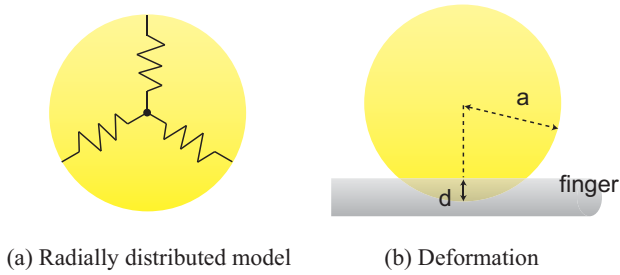


Fig. 3 Elastic model

式(2)の法線力はボールに働く垂直抗力 F'_y と等価なため、次式が成り立つ。

$$F'_y = \pi E \left(1 - \frac{y'}{a}\right) y'^2 \quad (6)$$

また垂直抗力は転がり方向の運動と以下の関係が成立する。

$$F'_y = m \left\{ \alpha'_{0y} - g'_y + 2\omega'_{0z} \dot{x}' + (\dot{\omega}'_{0z} + \omega'^2_{0x}) x' \right\} \quad (7)$$

垂直抗力が0以下のときにボールが指から離脱することに相当するため、この運動方程式を用いることでリリースの解析をおこなう。

3 シミュレーション

3.1 設定

転がりの距離が指先リンクの長さより短いと仮定した。Fig.4のように指先リンクに角加速度を与えてボールがリリースされるまでの挙動を解析した。また、ボールのヤング率を $E = 1, 10, 100$ の3種類でシミュレーションした。

3.2 結果

Fig.5はボールに働く垂直抗力を表している。比較のため、剛体モデルのときの垂直抗力も合わせて表示している。ヤング率を大きくしたとき、すなわち剛性を大きくして剛体に近づけていったときに垂直抗力の時系列がだんだんと重なってくる様子が見られる。これは提案した弾性モデルが剛体モデルの自然な拡張となっていることを表している。

ヤング率が小さいほど指に加わる最大の力が大きくなり、リリースまでの時間が長くなることからわかる。これは柔らかい物体ほど大きく変形して指に力がかかり、変位しているバネをもとへ戻すまで時間がかかることに相当している。

Fig.6はボールの変形による変位を示している。ヤング率が小さいほど変位も大きくなって弾性エネルギーが蓄積されるため、リリースの瞬間(変位が0へ戻る時刻)

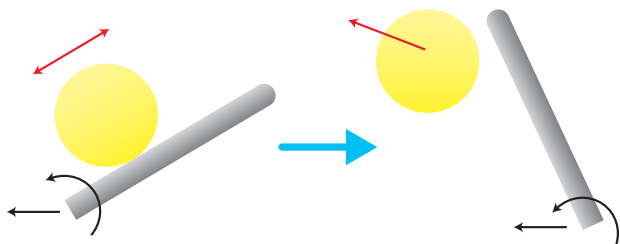


Fig. 4 Simulation setting

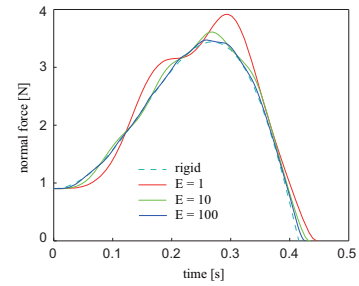


Fig. 5 Time response of normal force

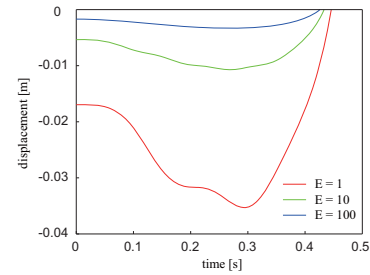


Fig. 6 Time response of displacement of a ball

の変位速度、つまりボールのリリース速度も大きくなることからわかる。

弾性要素の影響によるリリース時間の遅延は数十msであり、このとき指先方向に向かって転がるボールの距離および速度は非常に小さい。よって指リンクに垂直方向のボール速度が接線方向に比べて相対的に大きくなるので、3本指の保持状態から2本指へ遷移するタイミングを適切におこなえば、よりロバスタな投球方向の制御が可能になると考えられる。

4 まとめ

高速投球動作の制御をロバスタにおこなうために、弾性モデルを導入してリリースの解析をおこなった。今後の課題は、この解析をもとに力覚や触覚フィードバック制御と組み合わせ、投球実験を改良することである。

References

- [1] A. Namiki, Y. Imai, M. Ishikawa and M. Kaneko. Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching. IEEE/RSJ Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2666-2671, 2003.
- [2] T. Ishihara, A. Namiki, M. Ishikawa and M. Shimojo. Dynamic Pen Spinning Using a High-speed Multifingered Hand with High-speed Tactile Sensor. IEEE/RSJ Proc. of Int. Conf. on Humanoids, pp.258-263, 2006.
- [3] N. Furukawa, A. Namiki, T. Senoo and M. Ishikawa. Dynamic Regrasping Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System. Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.181-187, 2006.
- [4] T. Senoo, A. Namik and M. Ishikawa. High-speed Throwing Motion Based on Kinetic Chain Approach. IEEE/RSJ Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3206-3211, 2008.
- [5] <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/HighspeedThrowing/>