運動連鎖スウィングモデルに基づく高速スローイング動作

High-speed Throwing Motion Based on Kinetic Chain Swing Model

○正　妹尾 拓（東大）　正　並木 明夫（千葉大）　正　石川 正俊（東大）
Taku SENOO and Masatoshi ISHIKAWA, University of Tokyo, Taku_Seno@ipc.i.u-tokyo.ac.jp
Akio NAMIKI, Chiba University

In this paper the robotic throwing task is taken up in order to achieve high-speed dynamic manipulation. We propose a kinetic chain approach for swing motion focused on the torque transmission. In addition the release method using robotic hand is analyzed for ball control. Experimental results are also shown in which a high-speed manipulator throws a ball toward the target.

Key Words: high-speed manipulation, throwing motion, kinetic chain

1. はじめに

近年，センサやアクチュエータなどロボットコンポーネントの性能は顕著に向上しているが，マニピュレーションレベルでの運動能力，特に高速性に関しては依然として十分とは言い難い．高速マニピュレーションは，従来とは異なるアプローチでアプリケーションの実現を可能にする操り手法であり [1]，新たなロボット技能を開発するための一手段と成りうる．

本稿では高速マニピュレーションを実現するために，スウィング動作を基盤としたタスクを取り上げる．はじめに人間のスウィング動作を参考にした運動連鎖に基づくスウィングモデルを提案する．そして多指ハンドのリリース制御を導入することで，目標位置へボールを投球する高速スローイング動作を実現した (図 1).

2. 投球スウィングの高速化

本章では高速化の要因となる運動の構造が直交化したスウィングモデルを提案し，それをベースに効率的な高速動作を生成していく．

2.1 人間のスウィング動作

スポーツにおけるリリース時の人間の手先速度は発生パワーに対して特異的に速い運動を獲得している．これは全関節が力を最大限に発揮して身体を駆動するからではなく，むしろ脱力した状態で身体構造の干渉作用を利用することにより通常よりも高速な運動が可能になっている [2].

このような運動連鎖を 2 つの物理的要因に分けて考えてみる．1 つは平面的な運動連鎖であり，体幹から指先にかけて速度波形のピークの時間が次々と手先の部位へ移行していく特徴を持っている [3]．この原理は 2 次元的な運動であるゴルフスウィングでも観測されることから，平面的な運動連鎖であるといえる．もう 1 つはジャイロのように多重回転運動から発生する 3 次元的な慣性力である．このときに発生する慣性力（遠心力とコリオリ力）は，筋が直接生み出す力に対してその影響は大きいことが知られている [4].

2.2 スウィングモデル

高速動作を生み出すために，上記の二つの要素を導入したスウィングモデルを提案する．このモデルを図 2 に示す．1 軸目と 3 軸目の回転軸が鉛直方向で常に平行であり，平面的な運動連鎖を表現している．2 軸目の回転軸は常に水平面内に存在し，1 軸目と 2 軸目の回転軸が直交しているため，3 次元的な慣性力を表現している．

ここでは慣性モーメントを無視して振り子モデルとみなし，腕の相互作用を明確にするために重力項を省略する．上腕リンクの長さ・重心位置までの距離・質量をそれぞれ L_1, L_{1g}, m_1，前腕リンクの定数も同様に L_2, L_{2g}, m_2 と表す．また $C_i = \cos q_i, S_i = \sin q_i$ と定義する．トルクを $\boldsymbol{\tau}$ とすると，スウィングモデルの運動方程式は次式のようになる．

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \tag{1}$$

ここで $\boldsymbol{M}$ は慣性項，$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$ は遠心力・コリオリ力の項であり，その要素を以下に示す．

$$M_{22} = J_1 + 4J_2C_3^2 + 4A_{12}S_2C_3 + B_2$$
$$M_{23} = M_{32} = -A_{12}C_2S_3\ ,\ M_{33} = J_2$$

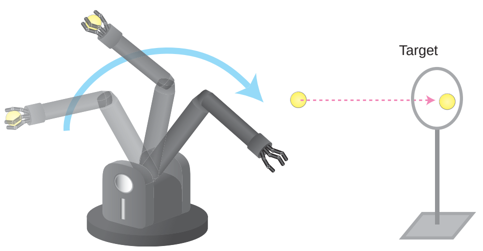

Fig. 1　Throwing motion using a hand-arm system

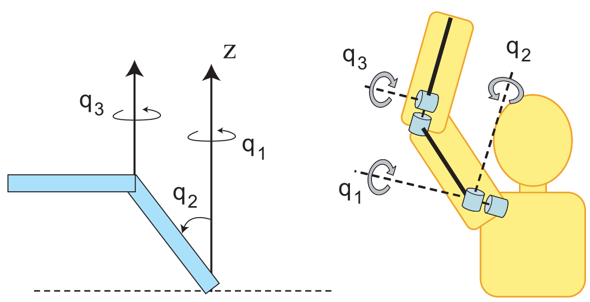

Fig. 2　Swing Model

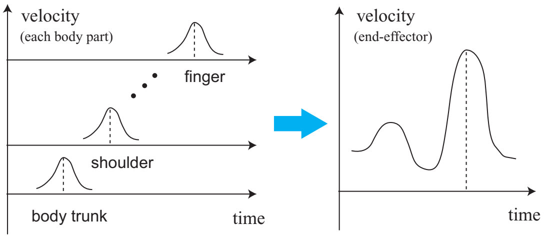

Fig. 3　Superposition of base functions

$$h_2=-\frac{1}{2}(J_1+B_2)\sin(2q_2)\dot{q}_1^2-4J_2\sin(2q_3)\dot{q}_2\dot{q}_3 \qquad (2)$$
$$-A_{12}C_2C_3(2\dot{q}_1\dot{q}_3+\dot{q}_3^2+2\dot{q}_2^2+\dot{q}_1^2)-4A_{12}S_2S_3\dot{q}_2\dot{q}_3$$
$$h_3=2A_{12}C_2C_3\dot{q}_1\dot{q}_2+A_{12}S_2S_3(\dot{q}_2^2+\dot{q}_1^2)+2J_2\sin(2q_3)\dot{q}_2^2$$
$$J_1=m_1L_{1g}^2\,,\ J_2=m_2L_{2g}^2\,,\ A_{12}=m_2L_1L_{2g}\,,\ B_2=m_2L_1^2$$

2.3　基底関数への分解

運動連鎖スウィングモデルについて，体幹のトルクを効率よく先端に伝達していくことを考える．このスウィングモデルでは 1 軸がパワーの発生機構に対応しており，2 軸と 3 軸はその相互作用によって運動するのが望ましい運動となる．そこで，体幹に相当する 1 軸以外の運動は $\boldsymbol{\tau}=0$ とおく．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\simeq\boldsymbol{0} \qquad (3)$$

ここでは体幹に近い部位（1 軸目）が瞬時に高速回転の定常状態まで到達できるものとし，以下の仮定をおく．

$$\dot{q}_1\gg\dot{q}_i\ (i\neq1),\ \ \dot{q}_1=\text{constant},\ \ \ddot{q}_1=0 \qquad (4)$$

また一般的に上腕は前腕より質量が大きいため，上腕の質量 m_1 を含むパラメータは含まないパラメータより大きいものと仮定する．

2 軸の運動を抽出するために，$\ddot{q}_3=0$ とおいて運動方程式 (3) に $\ddot{\boldsymbol{q}}=[0,\ddot{q}_2,0]^T$ を代入する．仮定 (4) およびパラメータに関する仮定 $J_1\gg J_2$，A_{12} を用いて影響の小さい項を省き，$\sin 2q_2$ の 1 次近似を用いて $\sin 2q_2\simeq 2q_2$ で近似する．すると 2 軸のダイナミクスは以下のように近似できる．

$$(J_1+B_2)\ddot{q}_2-(J_1+B_2){\dot{q}_1}^2q_2\simeq0 \qquad (5)$$

これは q_2 に関する 2 階微分方程式であり，その解は

$$q_2\simeq\alpha_2\exp\left(\omega_2t+\phi_2\right) \qquad (6)$$

となる．つまり exp 型の基底関数が慣性力による肘の伸展動作の形を表現することになる．

3 軸の運動を抽出するために，$\ddot{q}_2=0$ とおいて運動方程式 (3) に $\ddot{\boldsymbol{q}}=[0,0,\ddot{q}_3]^T$ を代入する．仮定 (4) を用いて影響の小さい項を省き，S_3 の 1 次近似を用いて $S_3\simeq q_3$ と表す．すると 3 軸のダイナミクスは以下のように近似できる．

$$J_2\ddot{q}_3+A_{12}{\dot{q}_1}^2q_3\simeq0 \qquad (7)$$

これは q_3 に関する 2 階微分方程式であり，その解は

$$q_3\simeq\alpha_3\sin\left(\omega_3t+\phi_3\right) \qquad (8)$$

となる．つまり sin 型の基底関数が平面的な運動連鎖の形を表現することになる．

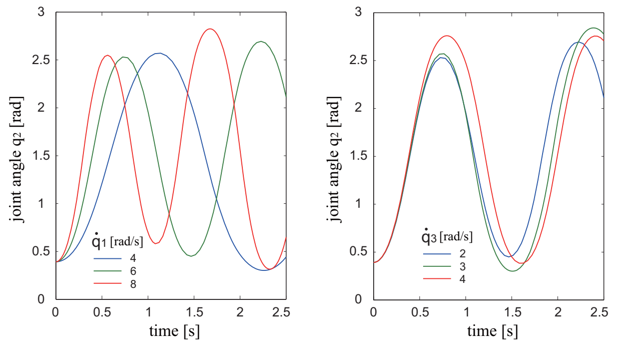

Fig. 4　Change of joint angle q_2 with respect to angular velocity

上記の基底関数に関する周波数パラメータ ω_2,ω_3 は式 (5)(7) から計算できるが，粗い近似式から導出されているため他のパラメータと同様に任意のパラメータとして扱うことにする．また，1 軸の運動も sin 型の基底関数で表現することにする．以上により，各関節の運動は波動に関するパラメータ $\boldsymbol{\xi}=[\boldsymbol{\omega}^T\ \boldsymbol{\phi}^T\ \boldsymbol{\alpha}^T]^T$ で表すことができる．2 軸の exp 型の規定関数は単調関数のため，ある適切な時刻で ω_2 の符号を切り替えて運動を停止するように設定する．

2.4　基底関数の重ね合わせ

導出された基底関数を図 3 のように重ね合わせることで手先速度を高速化する．

各関節の動作開始時間 t_{si} と終了時間 t_{ei} は，関節速度を 0 とおいて sin 型の基底関数より以下のように計算できる．

$$t_{si}=\frac{-\phi_i-\pi/2}{\omega_i}\ ,\ \ t_{ei}=\frac{-\phi_i+\pi/2}{\omega_i} \qquad (9)$$

2 軸の関節速度は exp 型の関数であるため厳密に速度が 0 になることはないが，同様に定義するものとする．

手先速度 $\dot{\boldsymbol{r}}_E(\boldsymbol{\xi},t)$ は，波動パラメータと時間の関数として表現できる．運動学的拘束条件・ダイナミクス拘束条件のもと，手先の速度を最大化するように波動パラメータ $\boldsymbol{\xi}$ を計算し，各基底関数の運動を決定する．

$$\max_{\boldsymbol{\xi},\,t}\dot{\boldsymbol{r}}_E^TK_r\dot{\boldsymbol{r}}_E \qquad (10)$$
$$\text{subuject to}\quad \boldsymbol{q}_{\min}\leq\boldsymbol{q}\leq\boldsymbol{q}_{\max}\,,\ \dot{\boldsymbol{q}}_{\min}\leq\dot{\boldsymbol{q}}\leq\dot{\boldsymbol{q}}_{\max}$$
$$\boldsymbol{\tau}_{\min}\leq\boldsymbol{\tau}\leq\boldsymbol{\tau}_{\max}\,,\ t_s\leq t\leq t_e$$

ここで添え字 max, min はその変数の最大値・最小値を表し，また $t_s=\min t_{si}, t_e=\max t_{ei}$，$K_r$ は正定値行列である．

2.5　シミュレーション

1 軸と 3 軸を回転させたときの 2 軸の運動 ($\tau_2=0$) を示したのが図 4 である．2 軸のスウィング開始直後の立ち上がりの運動は 3 軸の関節速度にほとんど影響されず，1 軸の関節速度によって変化することがわかる．これは基底関数 (6) の周波数が $\omega_2\simeq\dot{q}_1$ と近似できることに対応していて，近似したダイナミクスの妥当性を表している．また慣性力による自然な動きは，関節速度に関係なく $q_2=\pi/2$ を中心とした運動であることがわかる．

図 5 は最適化したときの関節速度およびトルクの時間応答を表している．2 軸の運動は 1 軸の運動と同時に開始を始め

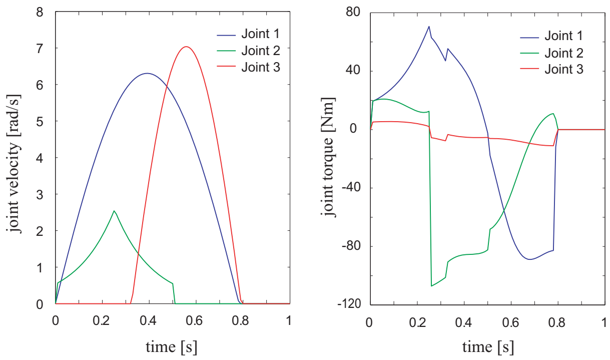

Fig. 5　Time response of joint velocity and joint torque

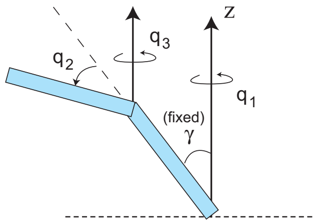

Fig. 6　Analogical swing model

た．これに伴い運動開始時の 1 軸のトルクは増大する一方，2 軸の値は 0 へ向かっている．これは 2 軸の基底関数 (6) の効果である．時刻 0.25 s 付近で急激に 2 軸のトルクの値が減少するが，これは関節角度の拘束条件のため $q_2 = \pi/2$ へ向かう力に逆らって運動を停止する方向へ切り替えたのが原因である．3 軸は 1 軸に遅れてスウィングを開始した．これは 1 軸と 3 軸において，平面的な運動連鎖に関するキネティックチェーンの特徴が再現されていることに相当している．3 軸のトルクに関しては運動開始から停止まで非常に少ないトルクしか発生していないが，その関節速度は大きい値を獲得していることがわかる．これは 3 軸の基底関数 (8) の効果である．

以上より基底関数から生成された運動を用いることで，体幹で発生したエネルギーが効率よく手先まで伝播し，手先の高速運動に貢献していることが検証された．

2.6　アナロジースウィングモデル

ここでは，図 2 と類似のモデルとして図 6 に示すアナロジースウィングモデルを考える．このモデルは上腕が鉛直軸に対して傾き γ で固定されていて，2 軸目は水平軸回りの運動で 1 軸目と 3 軸目の回転軸と直交している．

2 軸に関する運動を 2.3 節と同様に近似すると

$$J_2\ddot{q}_2 - J_2\dot{q}_1^2(q_2+\gamma) \simeq 0 \tag{11}$$

となる．この基底関数は exp 型となっている．同様にして 3 軸に関する運動を表現すると

$$J_2 S_{\gamma 2}^2 \ddot{q}_3 + A_{12}\dot{q}_1^2 S_\gamma S_{\gamma 2} q_3 \simeq 0 \tag{12}$$

となる．この基底関数は sin 型となっている．

以上の 2 つのスウィングモデルのアナロジーから以下のことが言える．2 つの平行する軸回りの運動に対しては平面的な sin 型の運動連鎖が起こる．それに直交する軸の運動は慣性力による exp 型の運動が出現し，sin 型の平行軸に垂直な面を中心に振動運動をする．これらの効果により，効率よく手先に向かってトルクが伝播していき高速な運動が可能となっている．

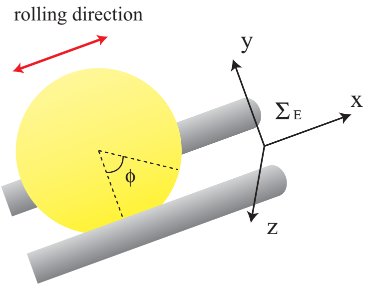

Fig. 7　Contact model between a hand and a ball

3.　投球ボールのコントロール

3.1　リリース戦略

多指ハンドを用いてボールを目標位置へ投球することを考える．リリース方法は文献 [5] で示したとおり，3 本指でボールを把持した状態から，ある時刻に 1 本の指 (支指) を離して残りの 2 本指 (投指) の接触に切り替え，投指が同じスナップ動作をおこないながらリリースする．

アームが高速スウィングしている状態のときに，指リンク上におけるボールの転がり運動を制御することは困難である [5]．そこで本章では，支指を離した瞬間にボールも同時にリリースする方法を採用する．またリリースタイミングに誤差が生じても，ボールの転がり運動が投球方向を保つように作用するロバストな制御方法であることを示す．

3.2　投球ボールの運動 [5]

基準座標系 Σ_0 に対して並進加速度 $\boldsymbol{\alpha}_0$・並進速度 $\boldsymbol{v}_0$・角速度 $\boldsymbol{\omega}_0$ で運動している図 7 の座標系 Σ_E を考える．x 軸を投指のリンク方向に，y 軸を投指が存在する平面に垂直な方向に設定する．ここで $m, \boldsymbol{r}, \boldsymbol{F}$ はボールの質量・位置・加わる力，$\boldsymbol{g}$ 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．このときボールの転がり運動は次式で記述できる．

$$\ddot{x}' = \frac{5}{7}\left\{-\alpha'_{0x} + g'_x + ({\omega'_{0y}}^2 + {\omega'_{0z}}^2)x'\right\} \tag{13}$$

ボールに働く垂直抗力 F'_y は以下のようになる．

$$F'_y = m\left\{\alpha'_{0y} - g'_y + 2\omega'_{0z}\dot{x}' + (\dot{\omega}'_{0z} + {\omega'_{0x}}^2)x'\right\} \tag{14}$$

また基準座標でのボール速度 $\boldsymbol{v}_B$ は次式のように表現できる．

$$\boldsymbol{v}_B = \boldsymbol{v}_0 + \dot{\boldsymbol{r}} + \boldsymbol{\omega}_0 \times \boldsymbol{r} \simeq \boldsymbol{v}_0 + \dot{\boldsymbol{r}} \tag{15}$$

文献 [5] の解析結果より，高速スウィング中におけるボールの転がり距離は非常に小さいので $\boldsymbol{\omega}_0 \times \boldsymbol{r}$ の項を無視して近似している．つまり投球の方向は，垂直抗力が 0 となった瞬間のボール速度のベクトル方向で表される．

3.3　リリースタイミングの制御

支指を離すと同時にボールをリリースするため，リリース時に垂直抗力 F'_y が 0 以下になるように制御する．支指を離した瞬間は指先リンク座標に対してボールは静止しているため，転がり距離および転がり速度が 0 という条件 $x' = 0, \dot{x}' = 0$ を

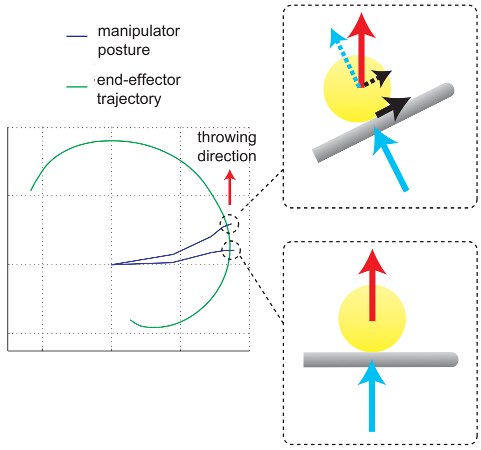

Fig. 8　Rolling effect for control of throwing direction

得る．このとき，式 (14) より垂直抗力は $F'_y = m(\alpha'_{0y} - g'_y)$ となる．よって，指先加速度の y' 軸成分が重力の y' 軸成分より小さいときに支持を離すように制御すれば，これと同時にボールもリリースされることになる．

$$\alpha'_{0y} \leq g'_y \tag{16}$$

3.4　リリース方向の制御

リリースポイントにおける指先軌道の接線方向が目標地点を向くように制御する．よって x' 軸方向の速度が正から負に切り替わるようにハンドを制御することで実現できる．

$$v'_{0x} = 0, \quad \alpha'_{0x} < 0 \tag{17}$$

このとき，式 (13) より投球ポイント近傍においてボールが転がる方向の加速度は $\ddot{x}' = \frac{5}{7}(-\alpha'_{0x} + g'_x)$ となる．よって $\alpha'_{0x} < g'_x$ の場合，転がり速度は $\dot{x}' > 0$ となって必ず先端方向に転がりだす．一方，リリース直後の x' 軸方向の指先速度は式 (17) より $v'_{0x} < 0$ になる．つまり制御誤差によってリリース時間の遅れが生じた場合には，図 8 のようにボールが目標のリリース方向を保つ方向に転がるように設定されており，ロバストな投球制御が可能となる．

4.　実験

4.1　実験設定

マニピュレータは半径 5 [cm] のボールを 2 [m] 離れたところにある半径 10 [cm] の目標ネットへ向かって投球した．リリース後のボール軌道は直線運動をすると近似して，投球方向の制御指令を計算した．アナロジースウィングモデルから運動を生成した．実機における可動範囲の制限と重力の影響を考慮すると，こちらの方が加速に寄与するトルクが大きくなるためである．また重力補償 PD 制御を用いた．式 (3) より動力学的な項を考慮した制御器と同等の効果を得ることができる．

4.2　実験結果

図 9 は手先の軌道を表している．肘の高さを中心に上下方向へ振動する exp 型のスウィング軌道が確認できる．図 10 の左側に 100 [ms] 間隔のマニピュレータのリリース動作の連続写真を示す．3 本指の把持状態から 2 本指接触へ切り替わり，ボールをリリースしている様子がわかる．右側に 99 [ms] 間隔

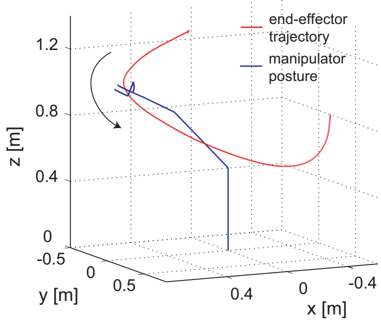

Fig. 9　Three dimensional trajectory of the end-efector

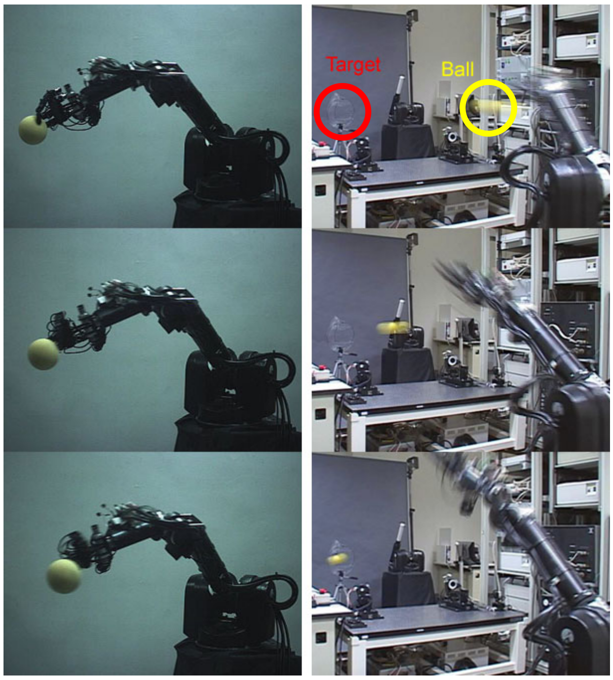

Fig. 10　Serial photographs of manipulator motion

のリリース後のマニピュレータの運動およびボール軌道の連続写真を示す．リリースされたボールが目標地点へ向かっていく様子がわかる．これらの実験結果は動画としてウェブサイト [6] で見ることができる．

5.　まとめ

運動連鎖モデルに基づく効率的な高速スウィングモデルの提案，および多指ハンドのリリース制御を組み合わせることで投球動作を実現した．今後の課題は，力覚フィードバックを導入した器用な高速マニピュレーションをおこなうことである．

文　献

[1] 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.
[2] 金子, 福永. バイオメカニクス–身体運動の科学的基礎–. 杏林書院, pp.262-268, 2004.
[3] C.A. Putnam. Sequential motions of body segments in striking and throwing skills. J. of Biomech., pp.125-135, 1993.
[4] Y. Mochiduki and T. Matsuo and S. Inokuchi and K. Omura. Dynamics analysis for the effect of centrifugal and coriolis forces in swing a bat. Int. symp. on Biomechanics in Sports, pp.393-396, 1993.
[5] 妹尾, 並木, 石川. 波動伝播に基づく高速スローイング動作. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門講演会 2007, 講演論文集 1A2-F10, 2007.
[6] http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/HighspeedThrowing/