解説

高速マニピュレーション

High-Speed Manipulation

並 木 明 夫* *千葉大学大学院工学研究科

Akio Namiki* *Graduate School of Engineering, Chiba University

1. はじめに

産業分野のロボットマニピュレータでは比較的単純な繰り返し動作は高速化されているのに対して、人間が行うような複雑で器用さを要する作業を高速に実行するのはいまだに難しい問題である。高速マニピュレーションは、器用な作業を高速に実行するために必要とされる様々な要素のブレイクスルーを達成し、人間以上の高速性を実現することを目的とする。本稿では、高速マニピュレーションの現状と課題を解説する。

2. 高速マニピュレーションに必要とされる速さとは

図1は一般的なマニピュレーションシステムの構成図であり、感覚系、処理系、運動系の三つの要素からなる。感覚系と処理系は主にロボットの「反応速度」に関係するのに対して、運動系は「運動速度」自体に関係する。そこで、それぞれに必要とされる高速性について議論する。

2.1 感覚系と処理系の高速化

ロボットの反応速度はどの程度であるべきだろうか？ 人間を参考にすると、視覚認識は約30 [Hz] (約33 [ms] ごと)で行われている。ただし、視覚刺激から腕が反応するまでの時間はより長く、単純な光刺激でも150~225 [ms]である。また、触覚や力覚は100~200 [ms]である[1]。これらから人間の反応速度はそれほど速くはないことが分かる。

一方、通常のマニピュレータをフィードバック制御する場合、1 [kHz] (1 [ms] ごと)以上の制御レートで安定化できることが知られている。そのため、関節角センサや力センサのサンプリングは1 [kHz]で行われる。視覚の場合は、通常のカメラでは30 [Hz]であるが、1 [kHz]以上のレート的高速ビジョン[2]を用いることができる。ロボットの場合は信号伝送の遅れは非常に小さいので、処理時間を無視すれば反応時間を1 [ms]にできる。このことは、ロボットの人間に対する大きなアドバンテージである。そこで、感

図1 High-speed manipulation system

覚認識や判断を高速化し、人間とは異なる原理でマニピュレーション能力を向上させるアプローチの研究が行われている。

2.1.1 高速ビジョン[2]

高速ビジョンは、画像取得から画像処理までをリアルタイムで行い画像特徴量を出力する視覚装置である。高速ビジョンを用いれば、ロボットにとっては周囲の環境が静止したように感じられる。一方、認識の高速化によって、相対的に処理時間に余裕ができ、この時間を活用することで認識や判断のロバスト性を上げることができる。例えば、フレーム間での画像の変化が小さいことを利用した画像処理アルゴリズムの簡略化の研究が行われている。これまでに高速ビジョンを応用した研究例として、グラスピング[3]、ピンセット操作[8]、キャッチング[4]~[6]、バッティング[7]、ドリブル[9]、ジャグリング[10]~[12]、けん玉[13]、柔軟物操り[14][15]、エアホッケーゲーム[16][17]などがある。

現状の高速ビジョンは主に速度性能に重点が置かれているが、マニピュレーション分野では画質も重要な条件となる。もし画像ノイズが大きいと、フィルタリングなどで時間をロスして高速性が損なわれることになる。これに対して、メガピクセルの高速ビジョンが開発されている[18]。また、アクティブビジョン、ズームフォーカス制御のような補助装置の高性能化も重要である。

2.1.2 触覚センサ

触覚センサを高速作業に対応させるには、高応答化と省配線化が必要となる。特に配線問題は重要で、多数の配線ケーブルによって動作が制限されるだけでなく、ケーブル

原稿受付 2013年3月11日

キーワード: High-speed Manipulation

*〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33

*1-33 Inage-ku, Chiba-shi, Chiba

図 2 Dextrous robot arms: (a) LWR-3 [22], (b) Barrett Arm [24], (c) High-Speed Arm [11]

表 1 Comparison of robot arms

	LWR [22]	WAM [24]	HS Arm [11]
Max. joint vel. [deg/s]	187	115	659~1,200
Max. vel. [m/s]		3	≈ 10
Payload [kg]	7	3	≈ 2
Weight [kg]	18	27	≈ 30
DOF	7	7	7
Length [mm]	1,024	1,000	660
Reduction drive	Harmonic Drive	Cable Drive	Harmonic Drive

断線による故障を引き起こす可能性がある。

これに対して、感圧導電性ゴムと導電フィルムを用いた簡略な構造を持つ Center of Position (CoP) センサが開発されている [19]。このセンサは接触点の重心検出が可能であり、構造が簡易で応答性も高く、配線の本数が少ない点が優れている。さらに、把持制御に重要な初期滑り検出も可能である [20]。本センサは、棒状物体制御 [21]、ジャグリング [12]、紐操り [14] などにも使用され効果を発揮している。

2.2 運動系の高速化

運動系では、「応答性」、「運動速度」の二つの要素が重要である。応答性では、機構の軽量化とアクチュエータの高出力化によって加速度を上げればよい。通常の電磁モータで十分な出力を出すには、高い比率の減速機が必要となる。一方、運動速度では、逆に減速比を低くして関節角の最大速度を上げたほうがよい。これらはトレードオフの関係にある。

2.2.1 高速アーム

通常の産業用アームでは、可搬重量を上げるために運動速度は比較的低位に設定されるが、研究用途では高速運動が可能なアームが開発されている。図 2 と表 1 はそれらの例を示したものである。LWR-3 [22] [23] は各軸に力センサを

図 3 High-speed multifingered hands: (a) Standard type [27], (b) Turning fingertip type [29], (c) Dual turning palm type [28], (d) Hyper redundant finger type [30]

内蔵した軽量なマニピュレータであり、Barrett Arm [24] は全関節がワイヤ駆動の低摩擦・低慣性マニピュレータである[†]。一方、高速アーム [11] は筆者らが開発した高速運動に適したロボットアームである。

高速アームでは、持続的な保持力よりも瞬時最大トルクを重視して各軸 1:50 の低減速比とし、大電流を流せるように外部に電流容量の大きいドライバを設置して、他のアームよりも数倍速い動作を可能とした。このアームを用いて、ジャグリング [11] [12]、けん玉 [13]、動的紐結び [25] などを実現されている。ただし、例えば人間の投球時の肩、肘の角速度は、それぞれ 9,000 [deg/s]、2,300 [deg/s] にもなるので [26]、これらの速度でも必ずしも十分ではない。

現状では、アームの性能を制限する大きな要素の一つは電源出力の大きさである。高速動作には大電流が必要となるがそのための電源設備は大きなものになってしまう。もう一つは、減速機構の機械的強度である。例えば、上記の Barrett Arm ではワイヤーケーブルの強度、高速アームではハーモニック減速機の機械的強度が最大トルク・最大速度を決める制約である。

2.2.2 高速ハンド

筆者らは、高速アームと同様の設計思想に基づいて高速ロボットハンドを開発している [27]。適切なタイミングで大電流を流すことで、高出力と軽量性を両立させ、各指は約 0.1 秒で全開できる程の高速性が実現されている。キャッチング [4]、ドリブル [9]、棒状物体制御 [21]、ジャグリング [10]~[12]、柔軟物操り [14] [15] などのタスクを実現している。

各関節は、小型のハーモニックドライブ減速機を用いた

[†]筆者らは、電源出力を標準品の 3 倍に改造した BarrettArm でエアホッケーシステムを実現している [16] [17]。また、バッテリー [7] や投球 [45] の実験では、外部に大容量の電源装置を持つ標準品の 3 倍程度の出力の BarrettArm を使用している。

アクチュエータモジュールからなり、組み替えることで様々なタイプ的高速ハンドが開発されている。開発例として、図3に示すように掌に2重旋回機構を組み込むことで、ボトルなどのキャップを開けるのに適したタイプ[28]、指先に旋回機構を付けることで操りの器用さを向上したタイプ[29]、各指に7自由度の超冗長自由度を持たせたタイプ[30]、などがある。

別のアプローチとして、1関節に2つのモータを使用した増幅機構を導入することで高出力と高速性を並立したハンドも開発されている[31]。

3. ダイナミックマニピュレーション

ダイナミックマニピュレーションは対象に加速度を加えて操りを行う手法であり[32]、高速マニピュレーションの課題の一つである。本章では、これまでに行われてきたダイナミックマニピュレーションの研究例を紹介する。

3.1 ダイナミックマニピュレーションの研究例

これまでにダイナミックマニピュレーションの研究として、ボールなどを用いたキャッチング、ジャグリングなどのタスクが数多く行われてきた。(1) エンドエフェクタに平面やカップなどを用いた非把持タイプ、(2) ロボットハンドを用いた把持タイプ、(3) 人の動きの模倣、学習を目的とした研究、の三つに分類して紹介する。

3.1.1 非把持タイプ

このタイプでは、衝突のモデル化が容易であり、制御系設計や理論解析の課題として行われることが多い。例えば、1自由度マニピュレータを用いた多面体等の投げ上げ・キャッチ制御[33]、2自由度マニピュレータを用いた楕円軌道に基づくジャグリングやけん玉[34][35]、ボールに対して鏡面対称となるように動作するミラーアルゴリズムによるジャグリング[36]、同様のアルゴリズムによる2ボールジャグリング[37]、高速ビジョンと3軸指モジュールによる高速ドリブル[9]、高速ビジョンによるバッティング[7]、力覚または視覚フィードバックによるバスケットボールのドリブル制御[38]、手先に弾性を持つ指先を用いたドリブル制御[39]、ピザの操作に発想を得たダイナミックマニピュレーション[40]、などがある。

3.1.2 把持タイプ

このタイプでは、多指ハンドとアームの協調制御、操り制御が主要な課題となる。一般に複雑なシステムになることが多く、開発は困難であることが多い。例えば、ステレオビジョンと高速マニピュレータによるボール・紙飛行機のキャッチ[41][42]、ロボットハンドの指を落下してくる対象に衝突させて対象の向きを制御するアクティブキャッチ[4]、落下してくる棒状対象に対して指先を当てて対象の並進と回転を完全に静止するキャッチ戦略の研究[6]、バネの弾性力を利用した動作速度が100[G]の加速度が可能な超高速

図4 Desired trajectory [11]

把持装置によるボールキャッチ[5]、多指ハンドアームと視覚を用いたボールキャッチ[43]、移動式双腕ヒューマノイドロボットにおけるボールキャッチ[44]、多指ハンドアームによる指先のリリース制御による投球動作[45]、などがある。

3.1.3 模倣、学習

主に、人の動きの模倣、学習を目的とした研究も行われている。人の動きを見まねで学習するけん玉ロボット[46]、ヒューマノイドロボットを用いた人間に近い動作でのジャグリング、キャッチング[47]、強化学習による、けん玉、テニスのスイングなどの動作[48]、などがある。ほかにも、人とキャッチボールをするヒューマノイドロボット[49]が開発されている。

3.2 高速ハンドアームによるジャグリング[11][12]

多指ハンドを用いたジャグリングは、キャッチング、スローイング、グラスピングなどを複合した高速性と器用さの高度な融合が必要なチャレンジングな課題である。本節では、筆者らの開発した高速ハンドアームを用いたジャグリングシステム[11][12]について紹介する。

図4に示すように、ジャグリング動作を投げ上げ動作、キャッチ動作、キャッチ姿勢から投げ上げの準備姿勢に移るためのリターン動作の三つの動作で構成し、三つの動作を順番に切り替えることでジャグリング動作を実現させる。図4の q_t 、 q_c 、 q_r は各動作を生成するための基準となる各関節角度であり、 t_t 、 t_c 、 t_r は各動作に要する時間である。

3.2.1 運動連鎖に基づく投げ上げ動作

投げ上げ動作は、各軸ごとに位相をずらした正弦波を用いて目標関節軌道 q_{di} ($i = 2, 4, 6$)を生成する。

$$q_{di}(t) = q_{ri} + A_i (1 + \sin(\omega_{ti} t + \phi_{ti})) \quad (0 < t < t_i) \quad (1)$$

振幅 A_i 、角速度 ω_{ti} 、位相 ϕ_{ti} を初期条件、終端条件、関節速度とトルクの拘束条件を満たすように最適化する。この方式の利点は、付根の軸から手先の軸まで適切に位相をずらすことで、運動連鎖により少ないパワーで加速できることである。

また、正確な投げ上げを行うためにはリリースのタイミ

図 5 Release control for juggling [12]

図 6 Regrasp in juggling [11]

ングが重要である。指からボールが離れるタイミングを正確に制御するために、図 5 のように指リンクに CoP センサ [19] を装着して、触覚フィードバックによりリリースのタイミングを制御する [12]。

3.2.2 視覚情報に基づくキャッチ動作

ステレオカメラを用いて三次元でボールの動きを計測し、カルマンフィルタを用いて落下位置の予測を行う。予測した落下位置を終端条件として、目標関節軌道 $q_d(t) \in \mathbf{R}^7$ を以下の三次多項式で生成する。

$$q_d(t) = a_c t^3 + b_c t^2 + \omega_t t + q_t \quad (0 < t < t_c) \quad (2)$$

ここで、 q_t , ω_t はキャッチ動作開始時のそれぞれ関節角、角速度である。係数 a_c と b_c は落下予測位置に依存して変わる。高速ビジョンの特性を活用して、1 [ms] ごとに取得した画像データに基づき係数を更新することで、応答性の高いロバスタなキャッチングが実現する。

3.2.3 リターン動作と持ち直し動作

リターン動作とは、キャッチ動作から投げ上げ動作に移るための動作であり、ボールを把持しながら、投げ上げの開始位置まで素早く移動する。アームの目標関節軌道は三次多項式で生成する。

ボールの投げ上げの軌道を安定させるためには、投げ上げ開始時には常に、一定の安定した状態でボールを把持している必要がある。そこで、リターン動作途中で図 6 のように、指をゆるめて把持状態を調整する持ち直し動作を行う。

さらに、リターン動作の時間を調整することで、ジャグリングの位相の制御も行う。

3.2.4 2 ボールジャグリング

図 7 に実験例を示す。二つのボールを 6 回ジャグリングすることに成功している。本タスクの難しさは、視覚フィードバックによるキャッチングの成功率と、投げ上げ動作の正確性にある。前者は、高速ビジョンによりほぼ失敗する

図 7 Continuous photos of a juggling task [11]

図 8 Air-hockey robot system [16] [17]

ことはないが、後者はまだ不十分であり、キャッチ範囲外に投げってしまうことがある。指先の微妙な力加減を調整する能力にはまだ改善が必要である。

3.3 高速エアホッケーシステム [16] [17]

高速マニピュレーションでは、比較的減速比が低いアクチュエータを用いることが多く、最大出力トルクが小さいので、その限界までのトルクを有効に活用する必要がある。筆者らは、この問題に対して、図 8 に示す人間とインタラクティブに対戦するエアホッケーロボットを対象に、モデル予測制御 (MPC) を適用することで解決している [17]。

MPC では、各ステップ k ごとに評価値 V_k を最小化する予測入力系列 $\hat{u}_i (i = k, k+1, \dots, k+H_p)$ を計算し、その最初の値のみをステップ k での制御入力 $u_k = \hat{u}_k$ として用いる。本システムでは評価値は次のようにする。

$$V_k = \frac{1}{2} \Delta \hat{z}_{k+H_p}^T S \Delta \hat{z}_{k+H_p} + \frac{1}{2} \sum_{i=k}^{H_p+k-1} (\Delta \hat{z}_i^T Q \Delta \hat{z}_i + \Delta \hat{a}_i^T R \Delta \hat{a}_i) \quad (3)$$

ここで、 $\Delta \hat{z}_i$ は予測ステップ i における手先の位置・速度の目標値からの偏差ベクトルであり、 $\Delta \hat{a}_i$ は手先加速度の

目標値からの偏差ベクトル, S , Q , R は重み行列, H_p は予測ステップ数である. この評価値では, 終端条件, 手先位置速度の追従性に加えて, 手先加速度の追従性までを評価しているので, 滑らかで高速な動作が生成される.

MPC はサイクルごとに最適制御計算を繰り返すので, 環境の変化に素早く反応しなければならない高速マニピュレーションに適している. これまでに, MPC を PD 制御や計算トルク法と比較した結果, 高速動作時の MPC の追従性能が優れていることを確かめている.

MPC の問題点の一つは計算負荷である. ここでは 4 自由度 Barrett Arm を用いているが, 高速動作は主に平面運動の 2 自由度のみである. そこで最適化時の制御入力追跡はこの 2 自由度のみとして計算量を削減した.

もう一つの問題点として, MPC ではモデル化誤差が大きいと予測値が外れてしまい, 制御性能が低下する. ただし, 今回のように, 高速動作が必要な軸が一部であり, それらにのみ MPC を適用するのであれば, システム同定も容易となり, モデル化誤差の影響は低減できると考えている.

4. 対象の運動を利用する高速マニピュレーション

前章は, 対象を高速に操作したいがための高速化であったが, 逆に動作の高速性を積極的に活用することで, 通常の操りでは実現できないような操作が可能となる場合がある. 本章では, その研究例を紹介する.

4.1 ダイナミックリグラスピング [10]

リグラスピングとは, 把持している物体を違う姿勢に持ち替える動作であり, 通常は 4 本以上の指を用いて, 3 本の指で安定に把持しながら, 残りの 1 指の接触位置を変えするというプロセスを繰り返して実現する. 一方, ダイナミックリグラスピングでは, 図 2 に示すように, 対象を上方に投げ上げて自由回転により姿勢を変化させ, 対象が落下している途中でキャッチする. これは一種のジャグリングを操りに応用したものであり, リグラスピングは一瞬で実現され, 操りに必要な指の本数も少なくすむ.

投げ上げ時には, 対象の重心と慣性モーメントを考慮して目的の位置姿勢に落とす. 例えば, 円柱のように軸対称な対象では, 回転軸を固定して投げ上げることができる. 落下位置姿勢の誤差が生じる場合は視覚フィードバックで補償する. このように, 対象の操りの途中で, 非接触状態 (自由空間運動) を含むことで, 瞬時の操りを可能としている. 同様な例として, 一点接触状態を利用して棒状物体の高速な操りが行われている [21].

4.2 柔軟物の動的操り [25]

紐や布, 紙などの柔軟物体を現状のロボットで操作するのは難しい. それは, 柔軟物体が超多自由度構造を持つものに対して, 少ない自由度のマニピュレータで操らねばならないためである. これに対して, 高速性を活用した動的操

図 9 Dynamic regrasping [10]

図 10 Dynamic rope knotting [25]

り手法が提案されている [25].

文献 [25] では, 無重力下では柔軟紐の端点をある一定速度で動かすことで, 端点の軌道をなぞるように紐を制御できることを示している. これは, 新体操競技においてリボンで形状を作るのに類似した操作であり, 重力下においても, 紐の運動を高速化することで近似的に同様の状況を作ることができる.

図 10 は, この原理を利用した動的紐結びのプロセスである. ロボットアームで紐の端点を持ち, まず紐を輪の形に造り (a)~(c), 次に輪と紐の端を衝突させて輪を作ることにより (d)~(f), 空中で紐結びを実現している. 同様の動作原理から, 布の折り畳み動作も実現されている [15].

5. ま と め

本稿では, 高速マニピュレーションの研究の現状と課題について紹介した. ロボットマニピュレーションの高速化はただチャレンジングな課題というだけではない. 高速化は実用的なアプリケーションにおいても重要課題であり, また, 高速化を実現する上で必要となる要素技術は, ロボットの高性能化のためのブレークスルーとなるものである.

参考文献

- [1] 田島: 反応時間, 人間の許容限界事典 (山崎, 他編). 朝倉書店, pp.445-448, 2005.
- [2] 石川: “超高速ビジョンの展望”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.3, pp.274-277, 2005.
- [3] 並木, 他: “高速センサフィードバックに基づく把握行動”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.7, pp.707-716, 2002.
- [4] Y. Imai et al.: “Dynamic Active Catching Using a High-Speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System,” ICRA, pp.1849-1854, 2004.
- [5] M. Kaneko et al.: “The 100G Capturing Robot – Too fast to see,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.8, no.1, pp.37-44, 2003.
- [6] M. Higashimori et al.: “Dynamic Capturing Strategy for a 2-D Stick-Shaped Object Based on Friction Independent Collision,” IEEE Trans. Robotics, vol.23, no.3, pp.541-552, 2007.
- [7] 妹尾, 他: “高速打撃動作における多関節マニピュレータのハイブリッド軌道生成”, 日本ロボット学会誌, vol.24, no.4, pp.515-522, 2006.
- [8] S. Mizusawa et al.: “Tweezers Type Tool Manipulation by a Multifingered Hand Using a High-Speed Visual Servoing,” IROS, pp.2709-2714, 2008.
- [9] D. Shiokata et al.: “Robot Dribbling Using a High-Speed Multifingered Hand and a High-Speed Vision System,” IROS, pp.3945-3950, 2005.
- [10] N. Furukawa, et al.: “Dynamic Regrasping Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System,” ICRA, pp.181-187, 2006.
- [11] 木崎, 他: “高速多指ハンドアームと高速ビジョンを用いたボールジャグリングシステム”, 日本ロボット学会誌, vol.30, no.9, pp.924-931, 2012.
- [12] 木崎, 並木: “ハンドアームによるボールジャグリングのための持ち直し動作およびリリースコントロール”, 第18回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.471-476, 2013.
- [13] 伊藤, 他: “高速ハンドアームによるけん玉の動的操り動作のための軌道決定手法”, 第18回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.574-579, 2013.
- [14] 山川, 他: “高速多指ハンドと高速視触覚フィードバックを用いた柔軟紐の結び操作”, 日本ロボット学会誌, vol.27, no.9, pp.1016-1024, 2009.
- [15] 山川, 他: “高速多指ハンドシステムを用いた布の動的折りたたみ操作”, 日本ロボット学会誌, vol.30, no.2, pp.225-232, 2012.
- [16] 松下, 並木: “ゲーム状況に応じた意思決定を行うエアホッケーロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.29, no.10, pp.954-962, 2011.
- [17] 大関, 並木: “エアホッケーロボットシステムにおける非線形モデル予測制御を用いた最適運動計画”, 第18回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.580-585, 2013.
- [18] I. Ishii et al.: “Development of High-Speed and Real-Time Vision Platform, H3 Vision,” IROS, pp.3671-3678, 2009.
- [19] 郡司, 他: “触覚センサによる滑り検出に基づく多指ハンドの把持力制御”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.6, pp.970-978, 2007.
- [20] S. Teshigawara et al.: “Highly sensitive sensor for detection of initial slip and its application in a multi-fingered robot hand,” ICRA, pp.1097-1102, 2011.
- [21] 並木, 他: “高速多指ハンドを用いた棒状物体の回転制御”, 第13回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.541-546, 2007.
- [22] <http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-3803/>.
- [23] G. Hirzinger et al.: “DLR’s Torque-Controlled Light Weight Robot III—Are We Reaching the Technological Limits Now?,” ICRA, pp.1710-1716, 2002.
- [24] <http://www.barrett.com/robot/products-arm-specifications.htm/>.
- [25] Y. Yamakawa et al.: “Simple Model and Deformation Control of a Flexible Rope using Constant, High-Speed Motion of a Robot Arm,” ICRA, pp.2249-2254, 2012.
- [26] M. Feltner and J. Dapena: “Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch,” Int. J. Sport Biom., vol.2, pp.235-259, 1986.
- [27] A. Namiki, et al.: “Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching,” IROS, pp.2666-2671, 2003.
- [28] 東森, 他: “二重旋回機構を備えた4本指ロボットハンドの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.24, no.7, pp.813-819, 2006.
- [29] 小柳, 並木: “転がり接触を考慮した多指ハンド教示システム”, 第18回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.199-205, 2013.
- [30] 横澤, 並木: “超多自由度ロボットハンドの開発”, JSME ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-L03, 2013.
- [31] T. Takayama et al.: “Three-Fingered Eight-DOF Hand That Exerts 100-N Grasping Force With Force-Magnification Drive,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.17, no.2, pp.218-227, 2012.
- [32] M. Mason and K. Lynch: “Dynamic Manipulation,” IROS, pp.152-159, 1993.
- [33] K. Lynch and M. Mason: “Dynamic nonprehensile manipulation: controllability, planning, and experiments,” Int. J. Robot. Res., vol.18, no.1, pp.1-92, 1999.
- [34] T. Sakaguchi et al.: “Motion Planning and Control for a Robot Performer,” ICRA, vol.3, pp.925-931, 1993.
- [35] T. Sakaguchi and F. Miyazaki: “Dynamic Manipulation of Ball-in-Cup Game,” ICRA, pp.2941-2948, 1994.
- [36] M. Beuhler et al.: “Planning and control of robotic juggling and catching tasks,” Int. J. Robot. Res., vol.13, no.2, pp.101-118, 1994.
- [37] A. Rizzi and D. Koditschek: “Further Progress in Robot Juggling: The Spatial Two-Juggle,” ICRA, pp.919-924, 1993.
- [38] G. Bätz et al.: “Robot basketball: A comparison of ball dribbling with visual and force/torque feedback,” ICRA, pp.514-519, 2009.
- [39] S. Haddadin et al.: “Exploiting potential energy storage for cyclic manipulation: An analysis for elastic dribbling with an anthropomorphic robot,” IROS, pp.1789-1796, 2011.
- [40] M. Higashimori et al.: “Dynamic Manipulation Inspired by the Handling of a Pizza Peel,” IEEE Trans. Robotics, vol.25, no.4, pp.829-838, 2009.
- [41] B. Hove and J.-J.E. Slotine: “Experiments in robotic catching,” Proc. IEEE American Control Conf., pp.380-385, 1991.
- [42] W. Hong and J. Slotine: “Experiments in hand-eye coordination using active vision,” Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol.223, pp.130-139, 1997.
- [43] B. Bäuml et al.: “Kinematically optimal catching a flying ball with a hand-arm-system,” IROS, pp.2592-2599, 2010.
- [44] B. Bäuml et al.: “Catching Flying Balls with a Mobile Humanoid: System Overview and Design Considerations,” IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, p.51, 2011.
- [45] T. Senoo et al.: “High-speed Throwing Motion Based on Kinetic Chain Approach,” IROS, pp.3206-3211, 2008.
- [46] H. Miyamoto et al.: “A kendama learning robot based on a dynamic optimization theory,” Proc. 4th IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, pp.327-332, 1995.
- [47] M. Riley and C. Atkeson: “Robot Catching: Towards Engaging Human-Humanoid Interaction, Autonomous Robots,” vol.12, pp.119-128, 2002.
- [48] J. Peters et al.: “Robot Skill Learning,” ECAI, pp.40-45, 2012.
- [49] J. Kober et al.: “Playing Catch and Juggling with a Humanoid Robot,” Int. Conf. Humanoids, 2012.

並木明夫 (Akio Namiki)

1999年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。1999年東京大学リサーチアソシエート, 2000年科学技術振興機構CREST研究員, 2004年東京大学大学院情報理工学系研究科講師, 2008年千葉大学大学院工学研究科准教授, 現在に至る。多指ロボットハンド, 視覚フィードバック制御, センサフュージョンの研究に従事。(日本ロボット学会正会員)