

視覚情報の時間遅れに頑健な動的物体操作

河村晃宏 田原健二 倉爪亮 長谷川勉 (九州大学)

1. 諸言

多指ハンドアームを用いた物体把持・操作システムの一つに、視覚サーボ系がある [1]。本システムでは、カメラなどの視覚センサから得られる情報を制御系のフィードバックループに組み込むことで、高精度なマニピュレーションが期待できる。一方で、視覚サーボ系の問題の一つに、低サンプリングレートや、得られた画像の演算処理や、データ転送に起因する時間遅れが挙げられる。例えば、安価なことから比較的に利用されやすい一般的な NTSC カメラのサンプリングレートは、30[Hz] 程度であり、通常数ミリ秒で制御されるロボットには不十分である。これに加え、取得画像に対する演算処理やデータの転送に要する時間遅れも考慮する必要がある。

この問題に対し、これまでにサンプリングレート 1k[Hz] の高速な視覚フィードバックシステムを用いる方法 [2] が提案されているが、高速度カメラはまだ一般的ではなく、計測可能な情報も限定されており、コストもかかる。また、カルマンフィルタなどを用いたモデル予測制御手法 [3, 4]、繰り返し完全追従制御手法 [5] などとも提案されているが、制御対象の運動モデルが事前知識として必要であるといった問題がある。

本研究では、制御対象である把持対象物体の事前知識を必要としない、視覚サーボの時間遅れに頑健な物体操作手法を提案する。本手法では、ロボットの指先位置・姿勢によって定義される仮想的な物体（仮想フレーム）の位置・姿勢を、把持物体の実際の位置・姿勢（実フレーム）の代わりにして制御する。その際、実フレームの位置・姿勢と、それぞれの目標値との誤差が減少するように、仮想フレームの目標値を設定し、実フレーム情報が獲得されたタイミングに応じて適宜更新を行うことで、間接的に実フレームの位置・姿勢を目標値へ収束させる。仮想フレームの目標値の更新時に、演算処理やデータ転送によって発生する時間遅れを考慮することで、時間遅れに頑健な物体操作を実現する。

2. システムのモデル

本論文で扱うハンドアームシステムは、それぞれ物体の位置姿勢の操作に十分な自由度を持つ多指ハンド部とアーム部によって構成されている。また、把持物体は、指先と物体との接触面が平面であること以外は、任意形状の物体とする。全ての指先は柔軟で半球形状とし、物体表面上で滑ることなく面接触を伴った回転接触を行うと仮定する。また、把持物体の重力の影響は十分に小さいとして考慮しない。図 1 に、ハンドアームシステムの指先と把持物体との関係を示す。 $x_i \in \mathbb{R}^3$ は指先半球中心位置であり、以降、添字 i は i 番目の指を意味し、全て慣性座標系で表す。また、腕部と i 番目の指はそれぞれ N_a と N_i の自由度を持ち、システム全体の自由度は、 $N_D (= N_a + \sum_{i=1}^N N_i)$ である。腕部の

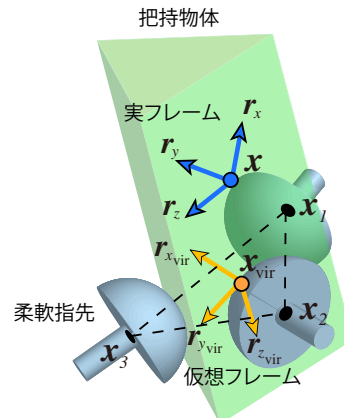


図 1 実フレームと仮想フレーム

関節角は $q_a \in \mathbb{R}^{N_a}$ 、 i 番目の指の関節角は $q_i \in \mathbb{R}^{N_i}$ と表し、ハンドアームシステム全体の関節角ベクトルは $q = (q_a^T, q_1^T, q_2^T, \dots, q_N^T)^T \in \mathbb{R}^{N_D}$ で表す。把持物体の位置・姿勢（実フレーム）はそれぞれ、 $x = (x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3$ 、回転行列 $R = (r_x, r_y, r_z) \in SO(3)$ で表す。

2.1 仮想フレーム

仮想フレームの位置・姿勢は、ハンドアームシステムの指先の位置・姿勢によって定義される [6]。まず、仮想フレームの位置 x_{vir} をロボットの各指先位置より以下のように定める。

$$x_{vir} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \in \mathbb{R}^3, \quad (1)$$

次に、この位置における仮想フレームの姿勢をロボットの各指先姿勢から決定される以下のような回転行列 R_{vir} で表す。

$$R_{vir} = (r_{x_{vir}}, r_{y_{vir}}, r_{z_{vir}}) \quad (2)$$

$$r_{x_{vir}} = \frac{\tilde{r}_{x_{vir}}}{\|\tilde{r}_{x_{vir}}\|} \in \mathbb{R}^3, \quad \left(\tilde{r}_{x_{vir}} = \sum_{i=1}^N r_{x_{fi}} \right) \quad (3)$$

$$r_{y_{vir}} = \frac{\tilde{r}_{x_{vir}} \times \tilde{r}_{y_{vir}}}{\|\tilde{r}_{x_{vir}} \times \tilde{r}_{y_{vir}}\|} \in \mathbb{R}^3, \quad \left(\tilde{r}_{y_{vir}} = \sum_{i=1}^N r_{y_{fi}} \right) \quad (4)$$

$$r_{z_{vir}} = r_{x_{vir}} \times r_{y_{vir}} \in \mathbb{R}^3, \quad (5)$$

ただし、 $r_{x_{fi}}, r_{y_{fi}}$ は指 i の指先姿勢を表す回転行列 R_{fi} の x 軸と y 軸を示すベクトルである。

3. 仮想フレームを用いた物体操作手法

本手法は、視覚センサで検出された物体の位置・姿勢情報を直接フィードバックするのではなく、物体の仮想フレームの位置・姿勢制御を行う。仮想フレームは、ロボットの指先位置・姿勢により定義されており、基本的に時間遅れや情報欠損は存在しない。そのため、

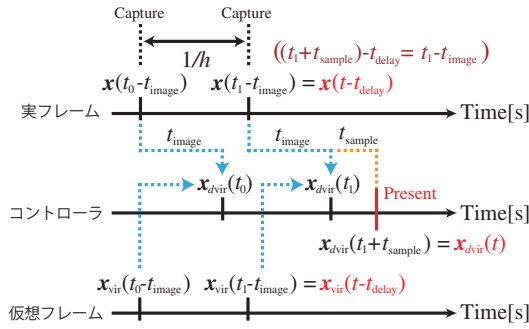


図2 実フレームおよび仮想フレーム，コントローラの時系列表

視覚情報の欠損や時間遅れ等による，システム全体の不安定現象は発生しない．まず，実フレームの位置・姿勢情報を基に，仮想フレームの位置・姿勢変化によって実フレームとその目標値の誤差が減少するよう，仮想フレームの目標値の設定を行う．その後，実フレームの位置・姿勢情報獲得に応じて仮想フレームの目標値の更新を繰り返すことで，間接的に実フレームの位置・姿勢制御を行う．しかし，仮想フレームの目標値の更新の際に，視覚情報に時間遅れがある場合，実フレームの位置・姿勢情報取得のタイミングと仮想フレームの位置・姿勢情報取得のタイミングがずれることとなり，システムの挙動が不安定になる恐れがある．そこで本研究では上記の操作に加え，視覚情報の時間遅れを考慮した仮想フレームの目標値の設定方法を提案する．

以下ではまず，本研究で想定する時間遅れについて定式化を行い，その後，提案する制御入力を示す．

3.1 時間遅れ

本研究では，低サンプリングレートによる時間遅れと，画像処理による計算負荷やデータ転送による時間遅れを分けて定式化を行う．まず，前者の低サンプリングレートによる時間遅れ t_{sample} を，サンプリング周波数 h を用いて以下のように表す．

$$0 \leq t_{\text{sample}} < \frac{1}{h} \quad (6)$$

例えば，フレームレート 30[Hz] の NTSC カメラを用いた場合は， $h = 30$ であり，時間遅れ t_{sample} は，コントローラが入力トルクを計算するタイミングに応じて，0[ms] ~ 33[ms] の間で変動する．

次に，画像処理やデータ転送による時間遅れを t_{image} と定義する．本手法では，この画像処理やデータ転送による時間遅れ t_{image} は観測可能とする．このとき，2つの時間遅れの合計 t_{delay} は以下のように表される．

$$t_{\text{delay}} = t_{\text{sample}} + t_{\text{image}}. \quad (7)$$

それぞれの時間遅れの関係を図2に示す．

3.2 制御入力

提案手法では，安定把持の制御入力 $u_s(t)$ ，仮想フレームの位置制御の制御入力 $u_p(t)$ および仮想フレームの姿勢制御の制御入力 $u_o(t)$ を用いて，入力トルクベクトル $u(t)$ を以下のように与える．

$$u(t) = u_s(t) + u_p(t) + u_o(t). \quad (8)$$

安定把持の制御入力 $u_s(t)$ を以下に示す．

$$u_s(t) = K_s \sum_{i=1}^N J_i(t)^T (x_{\text{vir}}(t) - x_i(t)) - C\dot{q}(t) + g(t) \quad (9)$$

$$K_s = \frac{f_d}{\sum_{j=1}^N r_j}, \quad (10)$$

ただし， $J_i(t)$ は各指の接触面中心の位置 $x_i(t)$ の各関節角速度 $\dot{q}(t) \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$ に関するヤコビ行列， C は関節粘性係数を表す正定対角行列， $g(t)$ はハンドアームシステムの重力補償項， f_d は目標把持力である．制御入力 u_s はそれぞれの指先が全ての指先位置の重心 x_{vir} に向かうような制御を行う．

次に仮想フレームの位置制御入力 $u_p(t)$ を以下に示す．

$$u_p(t) = K_p \sum_{i=1}^N J_i(t)^T (x_{d_{\text{vir}}}(t) - x_{\text{vir}}(t)), \quad (11)$$

ただし， K_p は正のスカラー量であり， $x_{d_{\text{vir}}}(t)$ は仮想フレームの目標位置を表す．このとき，仮想フレームの目標位置 $x_{d_{\text{vir}}}(t)$ を，実フレームの位置情報と実フレームの目標値の差分を用いて以下のように定める．

$$x_{d_{\text{vir}}}(t) = x_{\text{vir}}(t - t_{\text{delay}}) + (x_d - x(t - t_{\text{delay}})), \quad (12)$$

ただし， x_d は実フレームの目標位置， $x(t - t_{\text{delay}})$ は， t_{delay} [s] の時間遅れを含んだ実フレームの位置を示す．ここでは，仮想フレーム情報と実フレーム情報の取得時間を合わせるため，実フレームと同じ時間遅れを含んだ値 $x_{\text{vir}}(t - t_{\text{delay}})$ を用いる．実フレームの位置と目標位置との差分を用いて仮想フレームの目標値を設定することで，実フレームと仮想フレームの並進および回転の方向を同期させることができる．これにより，仮想フレームの位置と実フレームの位置を同時に目標値に収束させること可能となる．

最後に仮想フレームの姿勢制御入力 $u_o(t)$ を以下に示す．

$$u_o(t) = K_o \sum_{i=1}^N J_{\Omega i}(t)^T \{ r_{x_{\text{vir}}}(t) \times r_{x_{d_{\text{vir}}}}(t) + r_{y_{\text{vir}}}(t) \times r_{y_{d_{\text{vir}}}}(t) + r_{z_{\text{vir}}}(t) \times r_{z_{d_{\text{vir}}}}(t) \} \quad (13)$$

である． K_o は正のスカラー量であり， $J_{\Omega i}(t) \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$ は各指の接触面中心における姿勢角速度ベクトルの各関節角 $\dot{q} \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$ に関するヤコビ行列，仮想フレームの目標姿勢は回転行列 $R_{d_{\text{vir}}}(t) = [r_{x_{d_{\text{vir}}}}(t), r_{y_{d_{\text{vir}}}}(t), r_{z_{d_{\text{vir}}}}(t)] \in \text{SO}(3)$ で表される．このとき， $r_{x_{\text{vir}}}(t) \times r_{x_{d_{\text{vir}}}}(t)$ は $r_{x_{\text{vir}}}(t)$ が $r_{x_{d_{\text{vir}}}}(t)$ に向かうような回転モーメントを発生させる瞬時回転軸ベクトルであり， y 成分と z 成分についても同様である．このとき，仮想フレームの目標姿勢は，以下のように設定される．

$$R_{d_{\text{vir}}}(t) = R_d R(t - t_{\text{delay}})^T R_{\text{vir}}(t - t_{\text{delay}}), \quad (14)$$

ただし，実フレームの目標姿勢は回転行列 $R_d = [r_{x_d}, r_{y_d}, r_{z_d}] \in \text{SO}(3)$ で表される．仮想フレームの目標位置と同様に，実フレームの姿勢情報を用いて仮想フレームの目標姿勢を決定する．

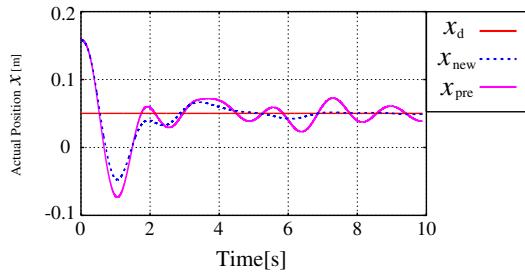


図3 提案手法および従来手法 [7] を用いたシミュレーションにおける実フレームの位置 (x 方向) の時系列データ

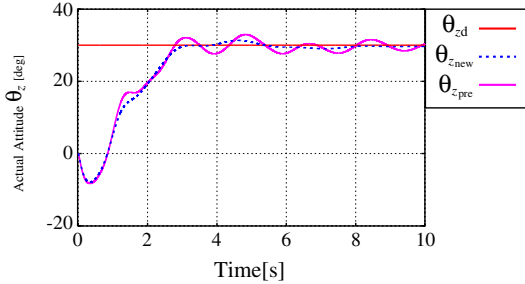


図4 提案手法および従来手法 [7] を用いたシミュレーションにおける実フレームの姿勢 (XYZ オイラー表現による z 軸周りの回転角度) の時系列データ

4. 数値シミュレーション

5 自由度の指 1 本と 4 自由度の指 2 本を持つ多指ハンド、および 5 自由度のアームを持つハンドアームシステムを用いて、三角柱の位置・姿勢制御の数値シミュレーションを行った。比較対象として、著者らによって提案されている把持物体操作手法 [7] を用いた数値シミュレーションも同様に行った。[7] で提案された手法では、本論文で提案する u_p と u_o の代わりに以下に示す制御入力 $u_{p\text{real}}$ および $u_{o\text{real}}$ を用いている。

$$u_{p\text{real}}(t) = K_p \sum_{i=1}^N J_i(t)^T (x_d - x(t - t_{\text{delay}})) \quad (15)$$

$$u_{o\text{real}}(t) = K_o \sum_{i=1}^N J_{\Omega i}(t)^T \{ (r_x(t - t_{\text{delay}}) \times r_{xd}) + (r_y(t - t_{\text{delay}}) \times r_{yd}) + (r_z(t - t_{\text{delay}}) \times r_{zd}) \}, \quad (16)$$

これらの制御入力では、仮想フレームを介さず実フレームの位置・姿勢情報を直接フィードバックしている。

本シミュレーションでは、第 3-1 小節に示した 2 つの時間遅れをそれぞれ $h = 20$ [Hz], $t_{\text{image}} = 50$ [ms] と設定した。図 3 および図 4 に、提案手法および従来手法 [7] を用いたシミュレーションにおける、実フレームの位置・姿勢の時系列データを示す。図 3 は把持物体の位置 $x(t)$ の x 方向の値を、図 4 は把持物体の姿勢 $R(t)$ の XYZ オイラー角表現による z 軸周りの回転角度を示す。また、図中の x_{new} および $\theta_{z\text{new}}$ は、提案手法を用いた場合、 x_{pre} および $\theta_{z\text{pre}}$ は、比較対象である [7] で提案された手法を用いた場合を示す。図 3 および図 4 より、提案手法は従来手法に比べ、振動が減少し

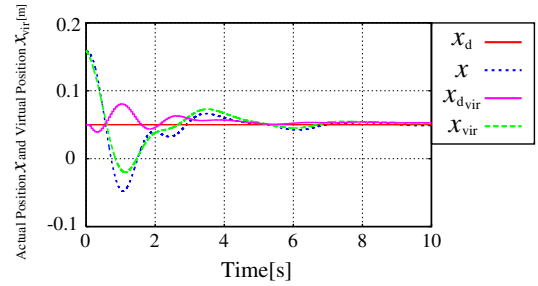


図5 提案手法を用いたシミュレーションにおける実フレームおよび仮想フレームの位置 (x 方向) の時系列データ

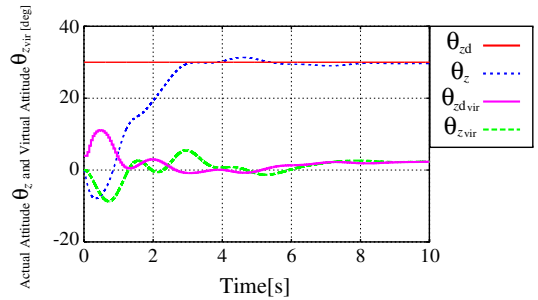


図6 提案手法を用いたシミュレーションにおける実フレームおよび仮想フレームの姿勢 (XYZ オイラー表現による z 軸周りの回転角度) の時系列データ

ており、また、目標値への収束も速いことがわかる。

図 5 および図 6 は、提案手法を用いた場合の仮想フレームの位置・姿勢およびこれらの目標値を示す。これらの図から、仮想フレームの目標位置 $x_{d\text{vir}}$ および姿勢 $R_{d\text{vir}}$ が視覚フィードバック情報によって、適宜更新されていることがわかる。

5. 実機実験

4 自由度の指 3 本で構成されるロボットハンドおよび視覚センサを用いて把持物体の位置・姿勢制御実験を行う。ここでは、数値シミュレーションと同様に、提案手法および従来手法 [7] について実験を行う。本実験で用いる把持物体は、軽量のポリスチレン製の正三角柱とする。質量が十分に小さいため、把持物体への重力の影響は小さいとして無視する。視覚センサには、Claron Technology 社製の Micron Tracker を用いる。本センサは、把持物体に取り付けた専用マーカの 3 次元位置・姿勢を計測することが可能であり、サンプリングレートは 20 [Hz]、画像処理およびデータ転送による時間遅れは平均 50 [ms] 程度である。実験機全体を図 7 に示す。本実験では、数値シミュレーションと同様に、提案手法および従来手法 [7] の比較による検証を行う。

図 8 および図 9 に、提案手法および従来手法 [7] を用いた実験における、実フレームの位置・姿勢の時系列データを示す。図 8 は把持物体の位置 $x(t - t_{\text{delay}})$ の x 方向の値、図 9 は把持物体の姿勢 $R(t - t_{\text{delay}})$ の XYZ オイラー角表現による x 軸周りの回転角度を示す。また、図中の x_{new} および $\theta_{z\text{new}}$ は提案手法を用いた場合、 x_{pre} および $\theta_{z\text{pre}}$ は比較対象である [7] で提案された手法を用いた場合を示す。提案手法では、把持物体

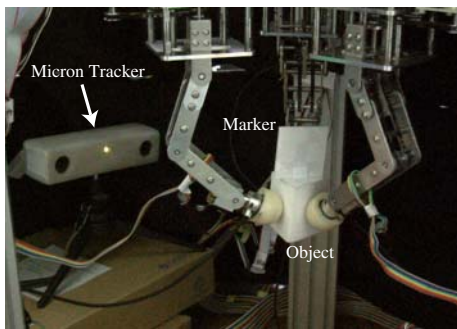
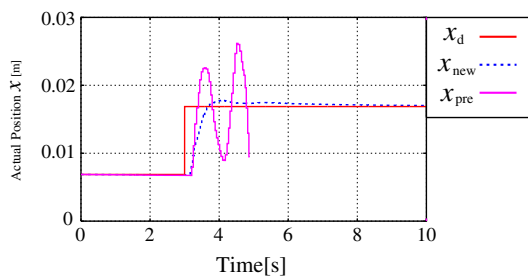
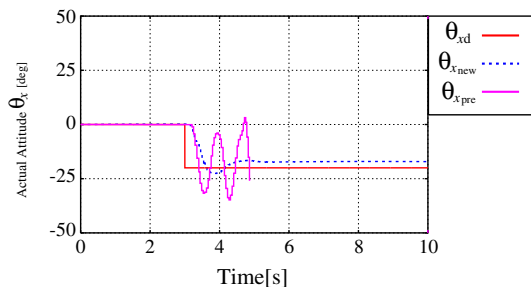


図7 3本指ロボットハンドおよび視覚センサ

図8 提案手法および従来手法 [7] を用いた実験における実フレームの位置 (x 方向) の時系列データ図9 提案手法および従来手法 [7] を用いた実験における実フレームの姿勢 (XYZ オイラー表現による x 軸周りの回転角度) の時系列データ

の位置・姿勢が目標値に収束しているのに対し、従来手法では、時間遅れにより振動が発生し、結果的に物体把持が破たんしている。図10および図11は、提案手法を用いた実験における、仮想フレームの位置・姿勢の時系列データを示す。数値シミュレーションと同様に、仮想フレームの目標位置 $x_{d,vir}$ および姿勢 $R_{d,vir}$ が、視覚情報によって適宜更新されていることがわかる。

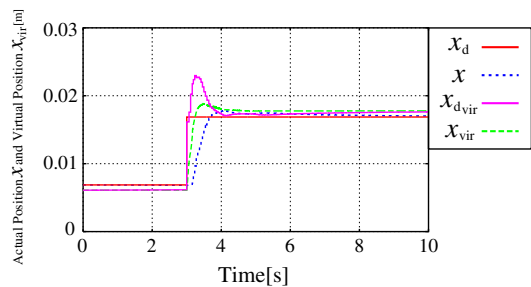
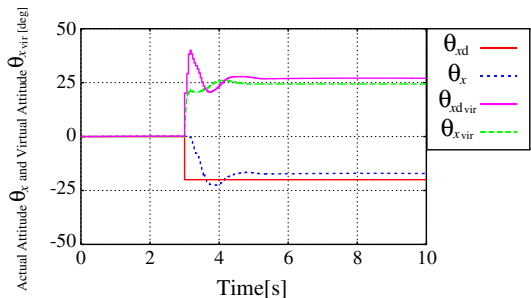
6. 結言

本稿では、視覚情報の時間遅れに頑健な物体把持・操作手法を提案した。まず、システムのモデルおよび指先の位置姿勢から定義される仮想フレームを示した。次に時間遅れの定式化を行い、仮想フレームを用いた制御入力を示した。最後に、数値シミュレーションおよび実験によって、提案手法の有効性を確認した。

今後は、提案手法の理論的考察を行い、システムの安定性に関する議論を行う予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、日本学術振興会科学研究費

図10 提案手法を用いた実験における実フレームおよび仮想フレームの位置 (x 方向) の時系列データ図11 提案手法を用いた実験における実フレームおよび仮想フレームの姿勢 (XYZ オイラー表現による x 軸周りの回転角度) の時系列データ

補助金特別研究員奨励費の助成を受けました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager and P. I. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. on Robot. and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 651–670, 1996.
- [2] Y. Nakabo, M. Ishikawa, H. Toyoda, and S. Mizuno, "1ms column parallel vision system and its application of high speed target tracking," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 650–655, 2000.
- [3] P. I. Corke and M. C. Good, "Dynamics effects in visual closed-loop systems," *IEEE Trans. on Robot. and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 671–683, 1996.
- [4] K. Hashimoto and H. Kimura, "Visual servoing with nonlinear observer," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 484–489, Nagoya, Japan, 1995.
- [5] H. Fujimoto and Y. Hori, "RRO Compensation of Hard Disk Drives With Multirate Repetitive Perfect Tracking Control," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 10, pp. 3825–3831, 2009.
- [6] A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa, "Robust manipulation for temporary lack of sensory information by a multi-fingered hand-arm system," *Proc. of the 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4201–4206, San Francisco, CA, 2011.
- [7] A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa, "Dynamic Object Manipulation using a Multi-Fingered Hand-Arm System: Enhancement of a Grasping Capability using Relative Attitude Constraints of Fingers," *Proc. Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 8–14, Estonia, Tallinn, 2011.