キャストイングマニピュレーションに関する研究*

(第2報, スイング動作の制御実験とグリッパの投射動作)

有 隅 仁^{*1}, 横 井 一 仁^{*1}
神 徳 徹 雄^{*2}, 小 森 谷 清^{*1}

Study on Casting Manipulation (2nd Report, Experiments of Swing Control and Gripper Throwing)

Hitoshi ARISUMI^{*3}, Kazuhito YOKOI,
Tetsuo KOTOKU and Kiyoshi KOMORIYA

^{*3} Mechanical Engineering Laboratory, Cybernetics Division, Robotics Dept.,
Namiki 1-2, Tsukuba City Ibaraki, 305-8564 Japan

We have been developing a casting manipulator which includes a flexible string in the link mechanism in order to enlarge the work space of the manipulator. We proposed the swing motion control for the first step of casting manipulation. In this paper we deal with the swing motion and the throwing motion of the casting manipulation. First, we demonstrate the effectiveness of the proposed swing motion control with various swing control experiments using the casting manipulator hardware. Next, we clarify the main factors that disturb throwing motion are the time delay of releasing the gripper and frictional force which disturbs the flying motion of the gripper based on results of throwing experiments. We propose a method of compensating these factors. The evaluation by comparing the results of numerical simulation with those of experiments has shown the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Robotics, Manipulation, Casting, Swing Motion, Throwing Motion, Flexible Link Mechanism, Friction

1. 緒 言

ロボットに実現したい特性の一つとして広い作業範囲が挙げられる。これを機構的に実現する手法として長い腕をもつ多自由度マニピュレータ⁽¹⁾⁽²⁾や本体が移動できるモバイルロボット⁽³⁾⁽⁴⁾などが研究されてきている。しかし、これらのロボットが、周囲に散乱する遠方の物体やアクセスするのが困難な場所にある物体を捕獲・回収する作業などに適しているとはいえない。それは、こうしたロボットの機構では腕の長さが固定されること、腕の操作や移動に大きなエネルギーが消費され効率が悪いこと、本体が移動可能といっても、急な傾斜面や深い窪みに対して車輪、脚、クローラなどの従来の移動機構では到達できない場合があることなどが理由である。

このような問題を解決するために、著者らはロボットの到達可能な領域を拡大する簡便な方法として、機構の一部にひものような柔軟かつ可変長なリンクを有するキャストイングマニピュレータを提案してい

る⁽⁵⁾。このロボットによる物体の捕獲・回収動作であるキャストイングマニピュレーションは、図1に示すような一連の五つの基本動作から成る。その特長は、スイングによってエネルギーを蓄積して大きな運動を生成することができることで、簡単な構成かつコンパクトでありながら、比較的広い作業範囲をもつことである。また、アームが軽量であるために敏速に動作で

Fig. 1 Phases of casting manipulation

* 原稿受付 1998年12月18日.

^{*1} 正員, 工業技術院機械技術研究所 (〒305-8564 つくば市並木1-2).

^{*2} 工業技術院機械技術研究所.
E-mail: arisumi@mcl.go.jp

き、捕獲・回収動作を簡便に繰り返し行うことができる。しかし、一方、ひもが不定形で非常に柔軟であり、張力しか保持できないという特性から、各時間において任意の運動姿勢を取れないという短所も有している。

前報では、図1の①スイング動作について、その分類を行い、ひもがゆるまない条件を考慮してスイング動作として定常な振り子運動を生成する手法を提案した⁽⁵⁾。

本研究では、前報で提案したスイング動作の制御手法の有効性を検証するため、まず、実験システムを試作し、励振・制振制御実験を行う。第2章でシミュレーション、試作実験システム、および実験結果とシミュレーション結果との比較について述べる。次に、②グリップ投射動作に注目して、グリップの投射タイミングを選定する手法について検討し、実機を用いたグリップの投射実験を行う。第3章で、基礎的な投射実験を行い、実験結果に基づき、投射の精度に影響を及ぼす要因を検討し、それらを補正する手法による効果について報告する。第4章で、本研究で得られた成果をまとめる。

2. スイング動作の制御実験

2.1 動作制御手法 まず、前報で提案したスイング動作の生成手法⁽⁵⁾について簡単に述べる。

前報で検討したシステムは、図2のような関節1のみを駆動する2リンクシステムで、その駆動力を τ とおいた。また、図2中の記号はおのおの L_i :リンク i の長さ、 d_i :関節 i からリンク i の重心までの距離、 m_i :リンク i の質量、 I_i :リンク i の重心回りの慣性モーメント、 θ_i :関節 i の関節角度を示す。ただし、ひも状柔軟リンクの質量は無視し、 m_2 はグリップの質量を示す。また、 g は重力加速度で、 Y 軸負方向に作用する。

スイング動作でひも状柔軟リンクがゆるまない場

Fig. 2 A casting manipulator with two links

合、図2のような関節1のみを駆動する2リンクシステムの動力学方程式は、次式のような形で表される。

$$A_{11}\ddot{\theta}_1 + A_{12}\ddot{\theta}_2 + A_{122}\dot{\theta}_2^2 + A_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + g_1 = \tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$A_{21}\ddot{\theta}_1 + A_{22}\ddot{\theta}_2 + A_{211}\dot{\theta}_1^2 + g_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$A_{11} = m_1 d_1^2 + m_2 (L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 C_2) + I_1 + I_2$$

$$A_{12} = A_{21} = m_2 (L_2^2 + L_1 L_2 C_2) + I_2$$

$$A_{22} = m_2 L_2^2 + I_2$$

$$A_{122} = -A_{211} = -m_2 L_1 L_2 S_2$$

$$A_{112} = 2A_{122}$$

$$g_1 = m_1 g d_1 S_1 + m_2 g (L_1 S_1 + L_2 S_{12})$$

$$g_2 = m_2 g L_2 S_{12}$$

である。また、

$$C_1 = \cos \theta_1, C_2 = \cos \theta_2, C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2),$$

$$S_1 = \sin \theta_1, S_2 = \sin \theta_2, S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

である。

ここで、式(1)は能動関節1のトルク τ に関する式、式(2)は非駆動関節2のトルクが零となることを表す式である。式(2)が系に対する動力学的な拘束になる。ここで、定常的なスイングを生成するために、関節2の運動が $\theta_2=0$ となるように関節1の駆動トルク τ を制御する場合、 θ_2 が目標値に達したときの θ_1 の運動は次式で表される。

$$\ddot{\theta}_1 = -a \sin \theta_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$a = \frac{m_2 g L_2}{m_2 (L_2^2 + L_1 L_2) + I_2}$$

この微分方程式は正準方程式に書き表せ、 θ_1 を横軸に、 $\dot{\theta}_1$ を縦軸にとる相平面図を示すと図3のようになる。可能な運動から図3中の灰色に塗られた領域に示されるだ円形に類似の軌道上の運動は振り子運動[モード(a)]を示すが、ここでは、グリップ投射時の安定性を考慮して、この振り子運動をスイング動作と

Fig. 3 Phase portrait of the periodic swing motion

Fig. 4 Swing states of excitation and suppression

Fig. 5 Amplitude of joint 1 by changing A_m

して選択する。

次に、振り子運動の振幅を制御するために、グリッパの加減速運動に着目する。図4に示すように、スイングの回転方向に対して、関節1とグリッパを結ぶ直線より、リンク2の位置を進んだ状態にすると、張力がグリッパの運動を助長する方向に働くためにグリッパは加速される。一方、関節1とグリッパを結ぶ直線より、リンク2の位置を遅れた状態にすると、張力がグリッパの運動を抑制する方向に働くためにグリッパは減速される。したがって、リンク2の位置(θ_2)を連続的に変化させることにより、振り子運動の振幅を変えることが可能となる。ここでは、滑らかな関節2の目標軌道を与えるために、サイクロイド曲線を用いて関節2の目標軌道を生成する。

図4に示す1回のスイング(振り子運動の半周期)中に関節2をサイクロイド曲線で変化させたとき、サイクロイド曲線の振幅を A_m 、関節2を変化させる前の振り子運動の振幅を θ_{1a} 、変化後の振り子運動の振幅を θ_{1b} とする。関節2の変化によって関節1の振幅が遷移する状態を A_m と θ_{1b} との関係を用いて図5に示す。各曲線は下からそれぞれ $\theta_{1a}=0, 10, \dots, 80$ deg のときの関係を示しており、すべて反時計回りのスイングの場合である。時計回りのスイングでは、図5の全曲線が θ_{1b} 軸に対して線対称の曲線になる。図5中の破線に挟まれた領域ではひもの張力が正に保たれ、破線より外側の領域では張力が負になる。

次に、図5を用いて関節1を目標振幅に収束させる

(a) Joint angles

(b) Tension of a flexible string

Fig. 6 Simulation results

方法を具体例で示す。

例えば、静止状態から振幅 80 deg の振り子運動を生成するには、図5中の下から順に○印で示す A_m でスイングすればよく、目標振幅の近傍まで大域的な運動計画を行うことができる。次に、図5の□印のように、関節1の目標振幅の近傍での制御を考える。目標点近傍では関節1の振幅を、目標点における曲線と接線で線形近似できる。したがって、 θ_{1b} 軸と直線 l との間に示す点線の遷移を行わせる局所的な運動計画をすると、目標振幅に収束させることができる。曲線の接線の傾きを K_m 、直線 l の傾きを K_l とすると、目標振幅へ収束させる A_m は以下の式から求められる。

$$A_m = \frac{1}{K_m + K_l} (\theta_{1a} - \theta_{1b}) \dots \dots \dots (4)$$

目標振幅 80 deg の振り子運動を生成するシミュレーションを行った結果を図6(a)に示す。大域的な運動計画では領域の境界線から余裕を取って $A_m=40, -40, 40, -40, 40, -15, 10, -5$ deg と与え、局所的な運動計画では $K_l=0, K_m=0.345$ と与えた。図6中の黒丸は、スイングの端となった時点を表し、点線は目標軌道を表す。また、張力の変化を図6(b)に示す。図6からひもがゆるまずに8回めのスイングで目標値に収束することがわかる。また、 θ_2 は目標軌道にほぼ追従し、収束後は零に極めて近い値になる。

2.2 動作制御実験 試作した2リンクキャスティングマニピュレータ実験装置の外観を図7に、制御システムの構成を図8に示す。

Fig. 7 Over view of casting manipulator

Fig. 8 Control system

剛体の第1リンクはジュラルミン製のプレートで、その一端を関節1を駆動するダイレクトドライブ (DD) モータの出力軸に固定している。他端にはポテンシオメータが取り付けられており、その回転軸上には、第2リンクとなるひもが通り抜けるラインガイドが装着されている。ポテンシオメータは、第2関節の角度の測定に用いる。ポテンシオメータの代わりに力覚センサを用いて第2関節の角度を測定する方法も考えられるが、ノイズの影響が大きく精度よく測定できないという問題がある⁽⁶⁾。ラインガイドを通ったひもは、リンク1の中心軸に沿って、関節1の回転中心の位置で方向を変え、固定端に取り付けたソレノイドによって拘束されている。ソレノイドに与える電圧を切ると拘束が解かれ、ひもが自由に繰り出される構造になっている。また、ひもの他端にはグリッパを取付けている。

制御システムはDDモータ駆動部、視覚による運動

Table 1 Specification of casting manipulator

L_1	0.339 m	L_2	0.58 m
m_1	0.465 kg	m_2	0.10 kg
I_1	0.001 kgm ²	I_2	0.001 kgm ²
d_1	0.156 m

Fig. 9 Experimental results

計測部、オペレータコンソール部からなる。DDモータ部では、DDモータへの指令をDA変換モジュールを介した電流制御モードで行い、剛体リンクの姿勢角を、DDモータに取り付けられたエンコーダにより発生するパルス信号をカウンタモジュールでカウントして取込む。また、ポテンシオメータの信号はAD変換モジュールにより制御用計算機に取り込む。視覚による運動計測部では、トラッキングビジョン(富士通製)によっていくつかの参照画像フレームをグリッパにセットすることにより、運動するグリッパの位置を計測できる。駆動部を制御する計算機、および運動計測部を制御する計算機はリアルタイムOS(VxWorks:ウィンドリバー社製)の利用によって、ネットワークを介して独立に動作できる構成になっており、それぞれのサンプリング時間は1 msec および 33 msec である。なお、機構定数は表1のとおりである。

図7に示すシステムを用いて、前述の静止状態から振幅 80 deg の振り子運動を生成する実験を行った。得られた実験結果を図9に示す。ただし、関節2の角速度は角度データの差分から1次のButterworth filterを通して求めた。同図に示すように目標振幅に8回めのスイングではほぼ到達し、その後、関節2は振幅約 3 deg の微小振動をするが、関節1への影響は非常に少ないことがわかった。以上の実験結果はシミュレーションの結果に非常によく一致しており、提案する手法の有効性が実験的に検証されたものと考えられる。また、ラインガイドを用いたひも状柔軟リンクの姿勢角の測定方法が実用可能であることがわかった。

3. グリッパの投射動作

3.1 投射基礎実験 目標物体を高い確率で捕獲するためには、グリッパを投射する前にキャスティングマニピュレータの数学モデルを構築し、それに基づき投射動作計画を行うことが有効である。しかし、グリッパの投射では、モデル化誤差等の影響によりグリッパが目標点からずれることが想定される。そこで、投射動作計画を行う前に、実機による投射動作の再現性の検討から、こうした外乱の影響を調べておく必要がある。具体的には、製作した実験装置を用いて、グリッパを投射したときの理論的な着地点と実験より得られる着地点との比較を行い、投射動作に影響を及ぼす要素の存在を確認する。なお、投射後の剛体リンクの挙動が、飛行中のグリッパの運動に不確定な影響を与えることを防ぐために、剛体リンクを投射位置で固定することにする。また、基本的な投射動作の検証のため、以下ではグリッパを質点として扱う。

まず、投射動作に影響を及ぼす要素が存在しない場合の理論的な着地点を求める。グリッパを投射してからグリッパが着地するまでの時間を t_d とすると、投射時のグリッパの位置 (X_r, Y_r) とグリッパが着地するときの位置 $(x_d, 0)$ の関係は次式のように表せる⁽⁷⁾。

$$\dot{X}_r t_d + X_r = x_d \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{Y}_r t_d - \frac{g}{2} t_d^2 + Y_r = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(5)、(6)より、 $t_d \geq 0$ に注意して t_d を消去すると、次式を得る。

$$x_d = \frac{\dot{Y}_r + \sqrt{\dot{Y}_r^2 + 2Y_r g}}{g} \dot{X}_r + X_r \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで関節1の位置を $(0, L_h)$ とし、投射時の関節角度 $(\theta_{1r}, \theta_{2r})$ 、関節角速度 $(\dot{\theta}_{1r}, \dot{\theta}_{2r})$ を与えると、グリッパの投射位置、速度は次式のように表される。式(8)を(7)に代入することにより、着地点位置 x_d が求まる。

$$\begin{aligned} X_r &= L_1 S_1 + L_2 S_{12} \\ Y_r &= L_h - L_1 C_1 - L_2 C_{12} \\ \dot{X}_r &= L_1 \dot{\theta}_{1r} C_{1r} + L_2 (\dot{\theta}_{1r} + \dot{\theta}_{2r}) C_{12r} \\ \dot{Y}_r &= L_1 \dot{\theta}_{1r} S_{1r} + L_2 (\dot{\theta}_{1r} + \dot{\theta}_{2r}) S_{12r} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$\begin{aligned} S_{1r} &= \sin \theta_{1r}, C_{1r} = \cos \theta_{1r}, S_{12r} = \sin(\theta_{1r} + \theta_{2r}), \\ C_{12r} &= \cos(\theta_{1r} + \theta_{2r}) \end{aligned}$$

である。

次に、2章で述べた振り子運動のスイングで投射する場合について、振幅 $\theta_{1\max}$ を 40, 50, ..., 80 deg、投射

Fig. 10 Throwing points

Fig. 11 Landing position

するときの関節角 θ_{1r} を 10, 20, ..., 70 deg と、それぞれ変えた指令値を与えて投射実験を行った。図10は指令値を与えて、実際に投射時点に測定した $(\theta_{1r}, \dot{\theta}_{1r})$ の値である。振り子運動による投射では、 $\theta_{2r} = 0$ となるように制御しているのので、投射時に測定した $\theta_{2r}, \dot{\theta}_{2r}$ は、ほぼ零になった。図10に示す各点は図3のような振り子運動を示す円軌道上にあり、その関係は式(3)により導き出される次式に一致する。

$$\dot{\theta}_{1r} = \pm \sqrt{2a(\cos \theta_{1r} - \cos \theta_{1\max})} \quad \dots\dots\dots (9)$$

図10に示す投射実験に用いた代表点の値および同時に測定した $\theta_{2r}, \dot{\theta}_{2r}$ を式(8)に代入し、さらに式(7)に代入することにより、理論的な着地点 $x_{d(\text{theory})}$ を求めると、図11の白丸のようになる。また、実際に着地したグリッパの位置 $x_{d(\text{exp})}$ を測定した結果を図11に示す。ただし、各代表点に対してそれぞれ5回投射を行い、着地点のばらつきの幅を線分で示している。ばらつきのおもな原因は、関節2の角度の測定に用いたポテンショメータの測定誤差によるものであると考えられる。ばらつき幅は最大 52 mm 以下となり、着地位置の繰返し精度が比較的高いことがわかる。図11, 12の結果を用いて着地点に関する理論値と実験値との誤差 $E_r = x_{d(\text{exp})} - x_{d(\text{theory})}$ を求めると図12になる。同図から最大 283 mm の誤差が生ずる

Fig. 12 Error of landing position

Fig. 13 Experimental setup for measurements of time delay and friction of string

ことがわかる。

3・2 誤差解析 着地点誤差を生ずる要因として、グリップ投射時のひもの拘束を解くタイミングの遅れ、グリップ飛行時のラインガイドにおけるひもの摩擦、およびグリップの空気抵抗などが挙げられる。ここでは、グリップのサイズ、速度から空気抵抗の影響は無視できるとして、誤差の主要な要因と思われるタイミングの遅れ、ひもの摩擦の影響について考察する。

3・2・1 時間遅れおよび摩擦の測定 まず、時間遅れを測定するために、図13に示すように重りの落下タイミングを測定する。具体的には、ソレノイドに電圧指令を与えてひもの拘束を解く時点から、重りが落下し始める時点までの時間 Δt を測る。重りが落下し始める状態は、重りとレーザ変位センサとの距離 s の変化をモニタすることによって把握する。関節角度 $\theta = 0 \text{ deg}$ として Δt を測定した結果を図14に示す。同図より約 $\Delta t = 0.014 \text{ sec}$ の一定値となった。グリップを投射してから2 m先に着地するまでの時間が0.7 sec以下であることを考慮すると、 $\Delta t = 0.014 \text{ sec}$ の時間遅れは投射に十分に影響を与えるといえる。

Fig. 14 Time history of weight position

Fig. 15 Time history of frictional force

Fig. 16 Frictional force by changing joint angle

次に、ひものがラインガイドを通り抜ける際のひもの摩擦力を測定する実験を行う。図13に示すようにソレノイドに電圧指令を与えてひもの拘束を解くことにより、ひもにつながった重りを自由落下させる。このとき、図7に示すように、ラインガイドに張ったひずみゲージにより、ひもの摩擦力を測定する。ひもの拘束の解放は測定開始から1秒後に行う。動ひずみ測定器には(株)共和電業のDPM-712 Bを用いる。関節1, 2の角度 θ を $0 \sim 90 \text{ deg}$ まで 10 deg おきに変えて固定し、落下実験を行った。 $\theta = 30, 50, 70, 90 \text{ deg}$ に対する摩擦力の時間的変化を図15に示す。同図から重りが落下していく速度に関係なくほぼ一定の摩擦力をひものが受けることがわかる。よって、摩擦は滑り速度

や接触面積の大小に無関係とするクーロンの法則に従う結果となった。ここで、それぞれの θ に対して、落下後に一定になる摩擦力を示すと図 16 になる。同図において関節角度 θ と摩擦力 F_r との関係を近似式で表すと次式のようにになる。

$$F_r(\theta) = k_1 \theta^2 + k_2 \theta \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $k_1 = 5.06 \times 10^{-5}$, $k_2 = 14.4 \times 10^{-5}$ である。ひもがラインガイドを抜ける際に摩擦が発生するのは、ひもの微小な曲げ剛性によるもので、ジャミングと呼ばれる現象⁽⁸⁾⁽⁹⁾に類似したものと考えられる。

3・2・2 補正方法

(a) 投射タイミングの遅れの補正

投射を行う指令を送信してから実際に投射されるまでの時間遅れ Δt は 0.014 sec と小さいため、実際に投射される角度は指令を送信したときの角速度を用いて、近似的に次式(11)のように補正できる。また、角速度は式(9)を用いて式(12)のように補正できる。

$$\dot{\theta}_{1r}(\text{modify}) = \dot{\theta}_{1r} \Delta t + \theta_{1r} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\dot{\theta}_{1r}(\text{modify}) = \sqrt{2a(\cos \theta_{1r}(\text{modify}) - \cos \theta_{1r}) + \dot{\theta}_{1r}^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、時間遅れ Δt は一定値として扱う。

(b) ひもの摩擦の補正

摩擦は、ひもが折れ曲がる部分、つまり関節部で生ずるので、摩擦力は関節 1, 2 の角度によって変化する。摩擦力の測定実験では $\theta_1 = \theta$, $\theta_2 = \theta$ という条件であったが、関節 1, 2 のラインガイドが同じ構造であるので、式(10)を用いて摩擦力は次式のように表せる。

$$f_r = \frac{1}{2} F_r(|\theta_1|) + \frac{1}{2} F_r(|\theta_2|) \quad \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 $|\theta_1| \leq 90 \text{ deg}$, $|\theta_2| \leq 90 \text{ deg}$ である。グリッパの飛行中にひもが摩擦力を受ける場合のグリッパの運動は次式のように表される。

$$m_2 \frac{d^2 x}{dt^2} = f_r \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$m_2 \frac{d^2 y}{dt^2} = f_r \sin \alpha - m_2 g \quad \dots\dots\dots (15)$$

Fig. 17 Motion of gripper in the air

ただし、 α は図 17 に示すようにひもと水平線とがなす角度である。また、グリッパ投射後の関節 1 の角度を θ_{1r} になるように制御すると α は次式のようになる。

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \theta_{1r} + \theta_2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

初期値データ (θ_{1r} , $\dot{\theta}_{1r}$) を与え、式(13)~(16)に対して数値演算を施すと、ひもの摩擦を考慮した場合の着地点が計算できる。

3・2・3 誤差の補正

投射実験において式(7), (8)により導出した理論的な着地点位置 $x_{d(\text{theory})}$ には、投射時間の遅れと繰出されるひもの摩擦の影響が考慮されていなかった。そこで、前節の補正方法を用いて理論的な着地点位置の補正を行う。図 10 に示した各投射点に対して、式(11), (12)による補正を行うと、投射時間遅れを補正した $\theta_{1r}(\text{modify})$, $\dot{\theta}_{1r}(\text{modify})$ を得る。これらを初期値として式(14), (15)に関する数値演算を行い、 $y=0$ となる終端条件を用いると補正された着地点 $x_{dm(\text{theory})}$ が得られる。数値演算にはルンゲクッタ法を用いる。このようにして得られた理論的な着地点を改めて実験値と比較するために、誤差 $E_r(\text{modify}) = x_{d(\text{exp})} - x_{dm(\text{theory})}$ を求めると図 18 のようになる。同図から全データが $E_r=0$ 周辺に分布することがわかる。これにより補正をかけた理論値と実験値との誤差は、122 mm 以内になる。摩擦の影響が個別の投射にかかわらず、ほぼ規則的に作用していて、摩擦のモデル化し、投射遅れを考慮することによって、誤差を補正できることが示された。

以上から、提案する誤差の補正手法を加えた投射タイミングの決定は、着地点の精度の向上に有効となる。

4. 結 言

本研究では、キャスティングマニピュレーションに

Fig. 18 Compensated error of landing position

おけるスイング動作ならびにグリッパの投射動作について、提案する手法を実験的に検証した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

(1) 2リンクキャスティングマニピュレータを試作し、システムを構築して、振り子運動を生成するシミュレーションならびに実験を行った。提案手法により目標とするスイング動作が実現可能であることを示した。

(2) グリッパの投射に関する基礎的な実験を行い、その結果に基づき、グリッパの着地点の精度に影響を与える要因として、投射タイミングの遅れ、繰り出されるひもの摩擦が主要なものであることを見出し、これらを補正する投射手法を提案した。実験により、提案手法が投射タイミングの決定に有効であることを示した。

本研究では、スイング動作、およびグリッパの投射動作について実験的に検証したが、目標物体を把握するために、グリッパの姿勢を考慮した投射動作計画法については、本研究成果をもとに今後検討する予定である。また、摩擦の影響を補正するばかりでなく、摩擦力を陽に用いてグリッパの軌道を変える方法もあわ

せて検討していきたい。

最後に、本研究を遂行するにあたり、多大なご支援、ご助言をいただいた機械技術研究所ロボット工学部谷江和雄部長、感覚制御研究室の諸氏に謝意を表する。

文 献

- (1) Kobayashi, H., Shimemura, E. and Suzuki, K. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems*, (1991), 173-178.
- (2) Takanashi, N., ほか2名, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems*, (1993), 636-643.
- (3) Khatib, O., Yokoi, K., Chang, K., Ruspini, D. and Holmberg, R., A. Casal, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems*, (1996), 546-553.
- (4) 例えば, 特集「ヒューマノイド」, 日本ロボット学会誌, **15**-7(1997), 961-985.
- (5) 有隅仁・ほか2名, 機論, **64**-626, C(1998), 3854-3861.
- (6) Arisumi, H., Kotoku, T. and Komoriya, K., *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1998), 3522-3527.
- (7) 有隅仁・ほか3名, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '98 講演論文集, (1998), 1 B II 3-4.
- (8) Whitney, D.E., Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts, *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 104(1982), 65-77.
- (9) 堀内英一, 第14回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, (1996), 523-524.