卓球タスクにおける仮想ターゲットの予測と実現方法

宮崎 文夫^{*1} 武内 将洋^{*2} 松嶋 道也^{*1}
 草野 貴充^{*1} 橋本 尚明^{*1}

Realization of the Table Tennis Task based on Virtual Targets

Fumio Miyazaki^{*1}, Masahiro Takeuchi^{*2}, Michiya Matsushima^{*1},
 Takamichi Kusano^{*1} and Takaaki Hashimoto^{*1}

The table tennis task involves dealing with the control and measurement issues that arise from the dynamical interaction between a robot and its environment. This paper describes how a robot with a flat paddle coordinates its movement in order to achieve efficient strokes for any given ball. We propose a method of generating stroke movement based on virtual targets that means the point at which the ball should be struck and the paddle velocity just before hitting the ball. These targets are predicted using inputs-outputs maps implemented efficiently by means of a k-d tree (k dimensional tree). The paddle approaches these targets by using a visual feedback control scheme similar to the mirror law proposed by Koditschek. The results of the implementation are also given to show the effectiveness of the proposed method.

Key Words: k-d Tree, Virtual Target, Table Tennis, Inputs-Outputs Map

1. ま え が き

ダイナミックに変化する環境下でロボットと環境が断続的に相互干渉するようなタスクを実行する場合には、ロボットには連続動作しながら相互干渉の強さやタイミングを調整する機能が要求される。このような問題を Burridge ら [1] はハイブリッド制御問題と呼んでおり、タスク例としてダイナミックな歩行や走行、ボールのスローイングやキャッチングなどをあげている [2]~[4]。人間の身体運動を解析する分野でも、ターゲットにタイミングを合わせて行うこれらの動作をタイミング動作と呼び、巧みさを感じさせる動作として注目している [5]。しかし、ハイブリッド制御問題に対する一般的なアプローチといえるものではなく、タスクに応じて個別の手法が提案されているのが現状である。本論文でとり上げる卓球タスクも典型的なハイブリッド制御問題であり、橋本ら [6] や Andersson [7] がロボットによる実行結果を報告している。Andersson は、ボールやロボットの動特性の陽なモデルを利用してボールの打撃動作生成の問題をボールの状態予測とラケットの軌道生成の問題に分離し、ボールの状態の逐次予測とそれに基づくラケットの目標軌道の更新によってハイブリッド制御問題に対処する方法を示した。しか

し、ロボットが生成できるラケット速度や加速度に限界があるため、実際にはヒューリスティックに設定した例外処理を多用している。

一方、スポーツ科学の分野では、トッププレーヤーのラケット操作の解析を通し、ボールを打ち返してから再び飛来するボールを打つまでの 1 ストロークのラケットの動きについて様々な仮説が示されている。その中で Ramanantsoa [8] は、1 ストロークの動作を四つのフェーズに分割し、各フェーズごとにボールの動きに合わせて時空間的な動作調整を行うモデルを提案している。このモデルでは、ボール打撃時のラケットスピードや位置を仮想ターゲットと呼び、ストローク動作はこの仮想ターゲットの予測と微調整に基づいて実行されるものと考えている。本論文はこのような考え方をロボットによって具体化することを目的としており、仮想ターゲットの予測には k dimensional tree (k-d tree) と呼ばれるデータ構造を利用した入出力マップ [9] [10] を、仮想ターゲットに基づく主要なストローク動作の生成には Koditschek [2] が提案したミラー則 (mirror law) に類似の視覚フィードバック制御を用いる。

仮想ターゲットの一つである打撃位置の予測は、飛来するボールのスピードやコースの観測結果からボールの打撃位置をできるだけ早めに決定する問題であり、ボールの空力特性や卓球台との反発特性を十分考慮する必要がある。本論文では、飛来するボールの状態を入力、打撃位置を出力とした入出力マップを利用して打撃地点を予測する方法を提案する。もう一つの仮想ターゲットである打撃時のラケットスピードの決定は、ボール

原稿受付 2001 年 6 月 15 日

^{*1}大阪大学大学院基礎工学研究科

^{*2}明石工業高等専門学校

^{*1}Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{*2}Akashi College of Technology

Fig. 1 Task oriented description of stroke movement

とラケットの反発特性も加わって打撃位置の予測以上に複雑な物理現象が絡む問題である。本論文では、ラケットをミラー則に類似した制御則によって駆動するものとし、ラケットスピードに対応するその制御パラメータを打撃位置の予測と同様の入出力マップを利用して決定する方法を提案する。また、これらの提案手法を用いて行った卓球タスクの実施結果を示す。

2. 卓球タスクの実現方法

卓球タスク実現のための基本的な枠組みを以下に述べる。

2.1 ラケット操作に関する前提

卓球タスクを実現するには、ラケットの位置の3自由度と姿勢の2自由度が操作できなければならないと Andersson は述べているが[7]、卓球台で跳ね返ったボールは重力の作用によって再び卓球台と同一高さの水平面をよぎるから、ラケットは最小限位置の2自由度と姿勢の2自由度が操作できればよい。本論文では、提案手法をできるだけ明確に述べるためにラケットの自由度は最小限の4自由度とし、一定高さの水平面上をラケットが二次元的に移動することによって飛来するボールを打ち返すものとする。

2.2 ストローク動作の分割

ボールを打ち返してから再び飛来するボールを打つまでの1ストロークのラケットの操作をタスクとしてとらえ、時間の経過を考慮して Fig. 1 のように分割してみる。 T_h はボールの打撃時刻、 T_r はラケットが待機位置へ復帰する時刻、 T_s は再び飛来するボールの打ち返し動作を開始する時刻を示している。A は飛来するボールを打ち返すタスクであり、卓球タスクの核となる。B は、ボールの打撃が完了したのち決まった待機位置へラケットを戻すタスクである。C は、ボールが再び飛来するまで待機するタスクであり、動作を伴わないがボールの状態を常時観測しながら仮想ターゲットを決定し A のタスク開始のタイミングを調整する役割を担う。以下では、卓球タスクの中で主要な動作を伴う A のタスクの実現方法についてその概要を説明する。なお仮想ターゲットの決定方法については、次章で詳しく述べる。

2.3 ボールの打ち返し動作の生成方法

ここでは、仮想ターゲットは待機タスク C ですでに決定され

Fig. 2 Mirror law

ているものとし、決定されたボール打撃時のラケットスピードおよび位置を実現する動作の生成方法について説明する。仮想ターゲットを実現するためにラケットの軌道を Andersson のように時間関数として与えると、打撃時刻を陽に求めなければならない。予測した仮想ターゲットに誤差があれば打撃時刻も誤差を生じるから、予測誤差の影響は拡大される。このため、仮想ターゲットの逐次更新は避けられない。このような方法に対して本論文では、打撃時刻を求める必要のない方法を提案する。Fig. 2 は、飛来するボールの位置に応じてラケットの位置を変化させ、予測した打撃位置でボールを打ち返す一連のラケットの動きを二次元的に表現したものであり、卓球台中央のネットの法線方向に X 軸、鉛直方向に Z 軸をとっている。提案手法では、ラケットは高さ一定の水平面内を移動するものとし、その X 方向の目標位置 X_p を以下のように与える (XZ 平面に垂直な Y 軸方向の移動も同様の手法を用いる)。

$$X_p = X_m + k(X_m - X_b) \quad (1)$$

X_m は予測したボール打撃位置、 X_b は時々刻々と変化するボールの位置を表している。式 (1) は、ジャグリングタスクにおける鉛直方向のボール打撃動作生成法として Koditschek ら [2] が提案したミラー則 (mirror law) を水平方向に焼き直したものとみえる。すなわち、ボール打撃位置 X_m に鏡を置き、その鏡に写ったボールの像 X_p を追ってラケットを移動させることに対応している。Fig. 2 において、ボールが 1 にあるときはミラーに写った像 1' を、2 にある時は像 2' をラケットに追従させる事によりボールがミラー位置 X_m 到達時 3 にはラケットもミラー位置に達するため、ミラー位置 X_m でボールを捉えることができる。なお式 (1) の k は、鏡に写ったボールの像の X 方向距離を調整するパラメータであり、ミラーゲインと呼ぶ。ミラーゲインを調整すればボール打撃時のラケットスピードを変化させることができるため、このパラメータを適切に設定することによって仮想ターゲットの実現をはかる。

3. 仮想ターゲットの決定

ボール打撃時のラケットスピードや位置に対応する仮想ターゲットは、Fig. 1 の待機タスク C に割り当てられた時間内に決定されなければならない。この許容時間は飛来するボールのスピードに大きく依存し、場合によっては待機タスクを設けることが不可能になることもある。ここでは、ボールの動きをとらえる視覚処理系のサンプリング時間 (1/60 [s]) を考慮して待機

Fig. 3 Table tennis task configuration

タスクの許容時間を約 0.2 [s] とし、その時間内に仮想ターゲットの決定を行うものとする。なお、この許容時間に対応したボールスピードの上限は約 5 [m/s] (通常のラリーが続くスピード) に相当する。

3.1 打撃位置の決定

Fig. 2 に示したボール打撃時のラケット位置 X_m の決定方法について説明する。飛来するボールの動きを Fig. 2 と同様二次元的に示した Fig. 3 において、計測開始地点 $X = X_o$ からボール位置 (X, Z) の計測を始めるものとする。ボールが打撃地点に到達するまでに待機タスクと打ち返しタスクを完了しなければならないから、計測開始後取得した数点のボール位置データから打撃位置を予測することになる。この打撃位置は、ボールが卓球台で跳ね返った後にラケットの移動高さ $Z = Z_h$ をよぎる X 方向の位置 X_m であり、計測開始地点付近のボールの位置 (X, Z) 、速度 (V_x, V_z) 、および角速度 ω_y に依存して変化する。形式的には

$$X_m = f(X, Z, V_x, V_z, \omega_y) \quad (2)$$

のような非線形関数として表現できる。この関数を陽に表現するにはボールの空力特性や反発特性を考慮しなければならないが、正確な表現を得ることは困難である。一方、このような非線形関数を入出力マップとみなし、実験的に得られる多くの入出力データを用いてマップを近似表現する方法もある。本論文ではこのような学習のアプローチをとることとし、さらにトレーニングに要する時間やデータの検索時間を短縮するために入力の低次元化を考える。

ボールが卓球台に衝突するまで角速度の変化がないものとする。ボールが卓球台と衝突した地点 X_r から $Z = Z_h$ の高さに至るまでの X 方向変位 X_d は

$$X_d = g(V_{xr}, V_{zr}, \omega_y) \quad (3)$$

のように、ボールが卓球台と衝突する直前の速度 (V_{xr}, V_{zr}) と角速度 ω_y に依存する。したがって、これらの値と X_r を事前に求めることができれば、低次元化された式 (3) の関係を用いて打撃位置 X_m を決定できる。しかし実際には、ボールが卓球台と衝突する以前に打撃位置を決定しなければならないため、本論文では式 (3) に代えて

$$X_m - X_r^* = g^*(V_{xr}^*, V_{zr}^*, a_z) \quad (4)$$

Fig. 4 Partitioning of 2-d space

The bucket size is 3.

Fig. 5 Corresponding k-d tree

の関係を入出力マップとして学習的に求める。なお式 (4) の X_r^* , (V_{xr}^*, V_{zr}^*) は、計測開始後取得した数点のボール位置データを用いて軌道を時間多項式で最小 2 乗近似して求めた X_r と (V_{xr}, V_{zr}) の予測値である。また角速度 ω_y はボールの速度および加速度の関数と考えられるから [11], 実際には近似軌道の加速度成分 a_z を ω_y に対応したマップの入力とする。予測を含む入力によって表現される式 (4) の入出力マップが適切な入出力関係を与えるものであることは、4 章で記述する主成分分析の結果からも裏付けられる。

式 (4) の入出力マップの近似表現方法として、2 分木 (binary tree) を多次元化した k-d tree を用いる。本論文のように、データ検索に要する時間が厳しく制限され、取得できるデータ量にも制約がある場合に特に効果的な方法と考えられる [12]. k-d tree は、 k 次元の入力空間を部分領域にリカーシブに分割し入出力データ対と各領域を対応付けたものであり、二次元の場合を図示すると Fig. 4 のようになる。また、そのときのデータ構造を Fig. 5 に示す。Fig. 5 において、各ノードは入力の成分に対応した判別子 (0 or 1) と領域の分割位置を特定する値を持っており、末端ノードには Fig. 4 の各領域内のデータが格納される。この k-d tree を用いて新たな入力データに対する出力を求めるには、まずそのデータが含まれる領域を探索し、領域中にすでに存在する入出力データ対を用いた補間処理を行う。領域中に十分なデータがなければ、近傍の領域も探索の対象に加え

る。なおトレーニング時には、入力データに対応した領域に入出力データ対を格納していき、格納データ数が事前に設定した上限値を上回る領域があれば格納データの出力の分散に基づいてその領域を2分するという手を繰り返すことにより、領域の細分化を行う。

3.2 打撃時のラケットスピード／ミラーゲインの決定

飛来するボールを卓球台上の目標地点に打ち返すには、ボール速度に応じてラケットの姿勢あるいは打撃時のスピードを調整する必要がある。本論文では、ラケット表面の法線が飛来するボールの軌道面（ボール軌跡を含む鉛直面）に平行し、水平面から一定の角度となるように θ_3, θ_4 を決めて打撃時のラケット姿勢を固定し、X方向のラケットスピードを制御して目標地点に打ち返すものとする。ラケットで打ち返されるボールの飛距離は打ち返し直後のボール速度および角速度に依存するが、これらの値は打ち返し直前の値とラケットスピードに依存する。さらに飛来するボールが卓球台で跳ね返った後ラケットに衝突するまでの過程を考慮すると、ボールの飛距離 L は

$$L = u(V_{xr}, V_{zr}, \omega_y, V_{racket}) \quad (5)$$

のように、ボールが卓球台と衝突する直前の速度 (V_{xr}, V_{zr}) 、角速度 ω_y とラケットスピード V_{racket} に依存するものと考えられる。また式(5)の関係は

$$V_{racket} = w(V_{xr}, V_{zr}, \omega_y, L) \quad (6)$$

と書き換えられる。式(6)はボールが卓球台と衝突する直前の状態と目標飛距離からラケットスピードを決定する関係を表している。実際には、ラケットスピードが打ち返し動作の生成時に用いるミラーゲイン k に対応することを考慮し、さらに打撃位置の決定時と同様に (V_{xr}, V_{zr}) に対してその予測値 (V_{xr}^*, V_{zr}^*) を、 ω_y に対して a_z を、 L に対して打ち返したボールの着地点 X_g と予測打撃位置 X_m の差をとり

$$k = w^*(V_{xr}^*, V_{zr}^*, a_z, X_m - X_g) \quad (7)$$

の関係を入出力マップとして近似的に表現しミラーゲインを決定する。

4. 実験結果

本章では、これまでに述べた卓球タスクの実現方法を実際の卓球ロボットシステムに実装して得られた結果を示す。なお以下では、前章と同様XZ平面内の卓球タスク実行結果のみを示す（実験では、YZ平面内の卓球タスクも同様な方法で行っている）。

4.1 卓球ロボットシステム

実験システムの全体図をFig. 6に示す。卓球ロボットは、一辺155[mm]の正方形のラケット（アクリル製）とその位置・姿勢の4自由度を操作する駆動系からなる。卓球台上に固定されたモータ1により、モータ軸とベルト接続されたベース1、2のX方向位置を、ベース1上のモータ2によりベルト接続されたベース3のY方向位置を制御し、ベース3上の二つのモータによってラケットのピッチ・ヨー角を制御する。なお、ラケッ

Fig. 6 Table tennis system

Table 1 Eigenvalue and eigenvector of R

	Eigenvalue	Eigenvector
λ_1	2.00	$[0.082, 0.439, 0.692, -0.567]^T$
λ_2	1.60	$[-0.716, -0.552, 0.095, -0.416]^T$
λ_3	0.35	$[-0.688, 0.579, 0.068, 0.432]^T$
λ_4	0.05	$[-0.082, 0.408, -0.712, -0.565]^T$

トの中心位置は195[mm]の高さを保って水平面内を移動する。Fig. 6に示した卓球台の手前側に設置した2台のカメラでとらえたボールの三次元位置は、動作解析システム（応用計測研究所製 Quick MAG System 3）を用いて1/60[s]ごとに計算機に取り込まれる。

4.2 打撃位置の推定結果

3.1節で説明したボール打撃時のラケット位置 X_m の決定方法に従って打撃位置を推定した実験結果を示す。まず、実験条件について説明する。Fig. 3に示した座標系の原点は、卓球台の中央から卓球ロボットの側に500[mm]移動した位置にとる。また、相手側卓球台上の $X = -1000$ [mm]の地点からボールの位置計測を開始するものとする。入出力マップ作成時には、この地点を通過した直後の133[msec]の間に取得される8点の位置データから最小2乗法を用いてZ方向の加速度成分 a_z およびボールが卓球台と衝突する位置 X_r^* 、速度 (V_{xr}^*, V_{zr}^*) を推定するとともに、ボールが卓球台と衝突して $Z = 195$ [mm]の高さになったときのX方向位置 X_m を計測し、入力 $(V_{xr}^*, V_{zr}^*, a_z)$ 、出力 $(X_m - X_r^*)$ のペアをマップデータに加えていく。

まず最初に、マップデータの相関関係を調べるために行った主成分分析の結果を示す。517個の入出力変数ベクトル $(V_{xr}^*, V_{zr}^*, a_z, X_m - X_r^*)$ に対する相関係数行列 R は

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0.5632 & -0.0089 & 0.2802 \\ 0.5632 & 1 & 0.5258 & -0.0550 \\ -0.0089 & 0.5258 & 1 & -0.8208 \\ 0.2802 & -0.0550 & -0.8208 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

となる。この行列 R の固有値、固有ベクトルはTable 1の通りである。固有値 λ_1, λ_2 の累積寄与率 $(\lambda_1 + \lambda_2) / \sum_{i=1}^4 \lambda_i$ が0.9となることから、ほとんどのデータが λ_1, λ_2 に対応した固有ベクトルで張られる平面付近に分布していることが分かる。また、 λ_1 に対応した第一主成分 z_1 は

$$z_1 \simeq 0.439V_{zr}^* + 0.692a_z - 0.567(X_m - X_r^*) \quad (9)$$

より、スピン等の影響を大きく受けるボールのZ方向の運動状態と飛距離の関係は、一方 λ_2 に対応した第二主成分 z_2 は

$$z_2 \simeq -0.716V_{xr}^* - 0.552V_{zr}^* - 0.416(X_m - X_r^*) \quad (10)$$

Fig. 7 Acquired input-output map

Fig. 8 Errors in the Z direction

より、ボールの初速度と飛距離の関係を表している。以上の結果より、入出力マップの入力ベクトルとして $(V_{xr}^*, V_{zr}^*, a_z)$ を、出力として $(X_m - X_r^*)$ を用いることが妥当であるとえられる。**Fig. 7** は、取得されたデータ点とともに探索点近傍の5点の入出力データを用いて得られた入出力マップを $(V_{xr}^*, V_{zr}^*, X_m - X_r^*)$ の部分空間の中で示したものである。最小2乗法による面近似を行ってデータを補間している。また**Fig. 8** は、**Fig. 7** のマップを用いて行った打撃位置の推定結果と実際にボールが $Z = 195$ [mm] の高さになったときのX方向位置の誤差を飛来したボールごとに表示したものである。このときのラケット姿勢は $\theta_4 = -\pi/8$ [rad] に固定している（ラケットをやや下向きに傾けた姿勢：Fig. 6 参照）。誤差の平均値は 1.5 [mm]、標本標準偏差は 25 [mm] であり、予測打撃位置ではほぼ確実にボールをラケットでとらえることができることが分かる。

4.3 ボールの着地点制御結果

前節で述べた打撃位置決定用マップを作成した後に、打撃時のラケットスピードに対応したミラーゲイン決定用マップを作成する。トレーニング時のデータは入力空間内にできるだけ一様に分布させることが望ましいことから、ミラーゲイン k をランダムに与え、ラケットスピードを様々に変化させてボールを打ち返す。ただし、実現できるラケットスピードの上限値 S_{max} を超えるミラーゲインを設定すべきではないから

Fig. 9 Trajectories of the ball and racket

Fig. 10 Errors in landing point (target: -1700 [mm])

$$k = \frac{S_{max}}{V_{xr}^*} U_r \quad (11)$$

に従ってミラーゲインを決める。ここで U_r は、 $0 < U_r < 1$ を満たす一様乱数である。ミラーゲインを設定した後、式 (1) に従ってラケットを駆動し、打ち返されたボールの着地点 X_g を計測し、入力 $(V_{xr}^*, V_{zr}^*, a_z, X_m - X_g)$ 、出力 k のペアをマップデータに加えていく。このようにして作成されたミラーゲイン決定用マップを用いて行ったボールの打ち返し結果の一例を**Fig. 9**に示す。◇で示した点は 1/60 [s] ごとにとらえたボール位置、+で示した点は 1/30 [s] ごとのラケット中心位置を表しており、時間の推移を矢印で示している。このときの打撃位置決定用マップで決定された打撃位置は $X_m = 50.2$ [mm]、ミラーゲイン決定用マップで決定されたミラーゲインは $k = 0.177$ 、打ち返したボールの目標着地点は $X_g = -1600$ [mm] である。飛来するボールをラケット中心（高さ $Z = 195$ [mm]）付近でとらえ、目標着地点の近くに打ち返していることが分かる。また**Fig. 10** は、ボールの目標着地点を $X_g = -1700$ [mm] に固定し、飛来するボールの状態を変化させて行った 150 球の打ち返し結果を示している。ボールを打撃するたびにミラーゲイン決

定用マップも更新されるので、試行回数が増えるにつれて着地点の誤差が減少していることが分かる。なお、着地点の平均値は $\bar{X}_g = -1694$ [mm], 標本標準偏差は 178 [mm] であり、ほぼ目標着地点の付近に打ち返している。

5. あとがき

本論文では、卓球タスクにおけるストローク動作の主要部分は仮想ターゲットの予測に基づいて実行されるものと考え、その予測のための二つの入出力マップを提案した。その一つである打撃位置決定用マップによってボールの打ち返し位置が決定され、もう一つのミラーゲイン決定用マップによって打撃時のラケットスピードに対応したミラーゲインが決定される。決定されたこれらの仮想ターゲットをミラー則に類似の視覚フィードバック則を用いてラケットの動作に反映させ、ほぼ確実にボールをラケットでとらえ目標の着地点付近に打ち返すことができることを示した。また、三つのフェーズに分割したストローク動作を連結し、対人のラリーが続けられることも確認した。ただし、本論文で実現した卓球タスクは必要最小限のラケット自由度と制御パラメータを用いて行ったものであり、打ち返し可能なボールの速度やコースが限定される。ラケットの自由度を増やし制御パラメータにラケット姿勢を付加した上で本論文の提案手法の有効性を実験的に検証することを今後の課題としたい。

参 考 文 献

- [1] R. R. Burridge, A. A. Rizzi and D. E. Koditschek: "Sequential Composition of Dynamically Dexterous Robot Behaviors," International Journal of Robotics Research, vol.18, no.6, pp.534-555, 1999.
- [2] M. Bühler, D. E. Koditschek and P. J. Kindlmann: "Planning and control of a juggling robot," International Journal of Robotics Research, vol.13, no.2, pp.101-118, 1994.
- [3] D. W. Aha and S. L. Salzberg: "Learning to Catch: Applying Nearest Neighbor Algorithms to Dynamic Control Tasks," Proc. of the Fourth International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics, pp.363-368, 1993.
- [4] S. Schaal and C. G. Atkeson: "Robot Juggling: An Implementation of Memory-Based Learning," Control Systems Magazine, vol.14, no.1, pp.57-71, 1994.
- [5] 大築立志:「たくみ」の科学. 朝倉書店, 1988.
- [6] H.Hashimoto, F.Ozaki, K.Asano and K.Osuka: "Development of Ping-Pong Robot System Using 7 Degree of Freedom Direct Drive Robots," Proc. IEEE IECON 87 Industrial Application of Robotics and Machine Vision, pp.608-615,1987.
- [7] R. L. Andersson: A Robot Ping-Pong Player: Experiment in Real-Time Intelligent Control. The MIT Press, 1988.
- [8] M. Ramanantsoa and A. Duray: "Towards a Stroke Construction Model," International Journal of Table Tennis Sciences, no.2, pp.97-114, 1994.
- [9] J. L. Bentley: "Multidimensional Binary Search Trees Used for Associative Searching," Communications of the ACM, vol.18, no.9, pp.509-517, 1975.
- [10] R. F. Sproull: "Refinements to Nearest-Neighbor Searching in k-d Trees," Algorithmica, 6, pp.579-589, 1991.
- [11] 宮崎文夫, 升谷保博, 広瀬英一, 中村大輔, 佐藤伸行: "LWR (Locally Weighted Regression) 学習によるスピンボールの状態予測", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.5, pp.684-689, 1998.
- [12] C. G. Atkeson, A. W. Moore and S. Schaal: "Locally Weighted Learning," Artificial Intelligence Review, 11, pp.11-73, 1997.

宮崎文夫 (Fumio Miyazaki)

1952年8月28日生。1979年大阪大学大学院基礎工学部研究科博士課程中途退学。同年大阪大学基礎工学部助手。1986年同助教授。1991年同教授となり現在に至る。機械システムの制御、ロボットの知能化に関する研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

松嶋道也 (Michiya Matsushima)

1978年1月6日生。2000年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。現在、大阪大学大学院基礎工学研究科在学中。

橋本尚明 (Takaaki Hashimoto)

1978年3月14日生。2001年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。現在、大阪大学大学院基礎工学研究科在学中。

武内将洋 (Masahiro Takeuchi)

1964年1月1日生。1986年広島大学理学部物理学科卒業。1988年兵庫県立姫路工業高等学校教諭。1990年明石工業高等専門学校講師。1998年同助教授となり現在に至る。ロボットの知能化に関する研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

草野貴充 (Takamichi Kusano)

1977年1月3日生。2001年大阪大学大学院基礎工学研究科修了。