

上肢運動訓練を目的とした仮想カーリング作業における人間の感覚運動特性

田中良幸*・松下和寛*・辻敏夫*

Sensorimotor Characteristics in Human Arm Movements during a Virtual Curling Task for Motor Rehabilitation of Upper Limb

Yoshiyuki TANAKA*, Kazuhiro MATSUSHITA* and Toshio TSUJI*

The present paper develops a virtual curling system using robotic devices based on the impedance training, with which a trainee manipulates the handle of the impedance-controlled robot and slides the virtual stone toward the center of the house, as similar as the actual curling game. The developed system can estimate trainee's hand impedance during the curling task to quantitatively evaluate an adaptation ability of musculoskeletal characteristics of the upper extremity. To design a training program and an evaluation index of training effects, standard hand motion and its dynamic properties for the virtual curling task are clarified through a set of training experiments with 18 volunteers.

Key Words: human hand impedance, trajectory generation, rehabilitation, impedance control, sensorimotor integration

1. はじめに

本格的な高齢化社会に突入したわが国では、リハビリテーションを必要とする患者数は増加の一途を辿っている。しかしながら、患者数に対する医師や療法士をはじめとする医療スタッフの絶対数は不足しており、近い将来には深刻な問題に発展するものと懸念されている。このような医療現場が抱える問題への対策としてロボット機器を利用したリハビリテーション支援に寄せられる期待は大きい。

最近では先端的なロボット技術やバーチャル技術を積極的に活用して、より安全で高度な機能を有する訓練支援システムの研究開発が活発に進められている^{3)~6)}。たとえば、Krebsら^{1),2)}は、インピーダンス制御したロボットの手先につけられたハンドルを訓練者に握らせ、ディスプレイに表示された円軌道などの運動パターンを追従させることにより、正常な上肢運動に必要な感覚神経機能の訓練を可能にしている。古荘ら^{4)~6)}は印加する電場に応じて粘性が変化する ER 流体を可変クラッチとして内蔵するアクチュエータを開発し、それを用いた上肢運動訓練システムの研究開発を行なっている。このような訓練支援システムを用いることで、訓練者の疾患状態や訓練効果を客観的に評価することが可能となり、訓練者の運動機能を効率よく回復させることが期待できる。しか

しながら、従来研究では開発システムの動作検証に重点が置かれており、システムが提示する運動タスクに対して訓練規範とすべき人間の運動特性は明確にされていない。

一方、われわれは高度に発達した感覚・知覚機能を使用して自己および外界の情報を受容・認知し、作業目的に応じて自らの運動特性を巧みに調節している。たとえば、水の入ったコップを口元に運ぶという単純な動作を例に挙げると、人間はコップの重さに応じた把持力を発揮し、腕のかたさ・やわらかさを調節しながら水がこぼれないようにコップを滑らかに口元へ移動させている。このような人間の優れた運動能力は主に中枢神経系と運動神経系の相互作用によって実現されており、その運動特性は一般に機械インピーダンス（剛性、粘性、慣性）を用いて記述することができる^{7),8)}。したがって、訓練により人間のインピーダンス調節能力を向上させることができれば、トレーニングやリハビリテーションに有効であると考えられる。

そこで辻らは、人間の手先インピーダンス調節能力に対するトレーニング法⁹⁾ならびにロボット・インピーダンスの知覚能力に対するトレーニング法¹⁰⁾を提案し、機械インピーダンスをキーワードとするインピーダンストレーニングシステムを開発した。そして、人間の運動能力と感覚・知覚能力の間にある密接な関係に着目し、インピーダンス制御したロボットと仮想現実感を使用して仮想テニスシステムを開発するとともに、作業の難易度に応じて人間が自らのインピーダンス特性を積極的に調節していることを明らかにした^{11),12)}。しかしながら、開発システムが提示できる訓練は1次元の直線運動に限定されていること、また作業中の手先インピー

* 広島大学大学院工学研究科 東広島市鏡山 1-4-1

* Graduate School of Engineering, Hiroshima University,
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-hiroshima
(Received May 8, 2006)

(Revised September 25, 2006)

ンス計測を主な目的としていたため、訓練プログラムや訓練効果の定量的評価を行なう上で必要となる基礎データが十分ではなかった。

そこで本論文では、2次元水平面における上肢多関節運動訓練を支援するために構築した仮想スポーツシステム¹³⁾を利用し、すばやい運動や十分な力を発揮できない訓練者でも可能な比較的ゆっくりとした動作を主体とするカーリングにおける投石者の上肢運動のみに注目する。そして、ストーンを目標に向かってリリースするという一連の動作を仮想カーリング作業と呼び、健常者による訓練実験を通じて仮想カーリング作業に対する学習過程における手先運動特性の推移を解析するとともに、熟練者の手先インピーダンス特性を計測する。そして、仮想カーリング動作における人間の手先運動特性を明らかにする。以下、2で開発した仮想カーリングシステムのハードウェア構成とインピーダンス計測機能について説明し、3では健常者による基礎訓練実験の結果について述べる。

2. 仮想カーリングシステム

2.1 システム構成

Fig. 1に開発した仮想カーリングシステムの概要を示す。本システムは水平面上での手先運動訓練を可能にするため、1自由度のメガスラストモータ（日本精工(株)製、最大推力： x 軸方向100 [N]、 y 軸方向400 [N]、エンコーダ分解能： x 軸方向4 [μ m]、 y 軸方向4 [μ m]）を上下に直交配置した。テーブルの可動部にはハンドルと6軸力覚センサ（ニッタ(株)製、分解能：並進力 x 軸： 5×10^{-3} [N]、 y 軸： 5×10^{-3} [N]、 z 軸： 15×10^{-2} [N]、回転力： 3×10^{-3} [Nm]）が取り付けられており、訓練者がハンドルに加える手先力を計測する。そして、各テーブルに内蔵されたエンコーダの値から、ハンドル（手先）の位置を求めることができる。

ロボットはインピーダンス制御¹⁴⁾されており、訓練者の手先にさまざまな運動負荷を仮想的に設定することができる。そして、訓練者の運動特性を筋レベルから定量的に解析評価するため、訓練中の手先インピーダンス特性を推定する機能も有している。

表示用ディスプレイには仮想カーリング空間が提示され、訓練者は与えられた視覚情報を基に作業状態を把握しながらトレーニングを行なうことができる。Fig. 2に本システムが提示する訓練画面の一例を示す。仮想空間はOpenGL言語により記述しており、訓練者が操作するハンドルの挙動に同期してストーンが移動する。

本システムではDSP装置（AD5410、(株)エー・アンド・デイ製）を用いて計測データを処理するとともに、MATLAB/Simulink (Mathworks Inc.) 上で行なったリアルタイム・シミュレーションの結果に基づいて高精度かつ安定したロボット制御系を実現している。また、TCP/IPプロトコルを用いてネットワーク上に仮想的な共有空間を作成し、遠隔地訓練を想定した対戦型訓練も可能としている。

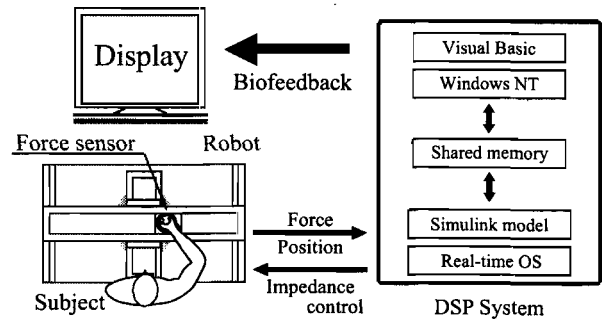


Fig. 1 An overview of the impedance training system

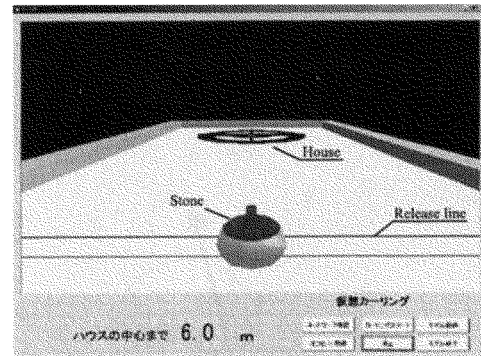


Fig. 2 Example of a biofeedback display in Virtual Curling

2.2 仮想カーリングモデル

Fig. 3(a)に仮想カーリング作業の概念図を示す。訓練者はロボットの可動部に取り付けられたハンドルを握り、半径 R_h のハウス中心点 O_h に向けて半径 R_s の円盤型ストーンを投げ出すという実際のカーリングを簡略化した作業を行なう。ストーンは初期位置から前方へ距離 d のライン上で自動的にハンドルから切り離され、手からリリースされるものとした。課題タスクを達成するため、訓練者は y 軸方向にストーンを押し出すための運動制御だけでなく、手先がハウス中心方向から x 軸方向にズレないように手先軌道を常に制御する能力が要求される。したがって、2次元自由空間において1次元直線運動を要求する仮想カーリング作業は、ガイドのある1次元拘束運動時よりも高度な運動調節能力が要求される。ここで、ストーンは質量 m_s を有し、ストーン表面の法線方向への力学特性はバネ要素 k_s とダンパ要素 b_s からなる1自由度の粘弾性モデルで表現した。また、周囲の壁は完全剛体とした。

仮想カーリングにおけるロボットの挙動は、インピーダンス制御を用いて以下のようにした。

$$F_e = \begin{cases} (M_r + M_s)\ddot{X}_e + (B_r + B_{floor})\dot{X}_e & (0 \leq y \leq d) \\ M_r\ddot{X}_e + B_r\dot{X}_e & (y > d) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $F_e \in \mathfrak{R}^2$ は訓練者が発揮した手先力、 $X_e \in \mathfrak{R}^2$ はロボットに取り付けられたハンドル（訓練者の手先）の位置、 $M_r = \text{diag}(m_r, m_r) \in \mathfrak{R}^{2 \times 2}$ 、 $B_r = \text{diag}(b_r, b_r) \in \mathfrak{R}^{2 \times 2}$ はハンドルの慣性と粘性摩擦、 $M_s = \text{diag}(m_s, m_s) \in \mathfrak{R}^{2 \times 2}$

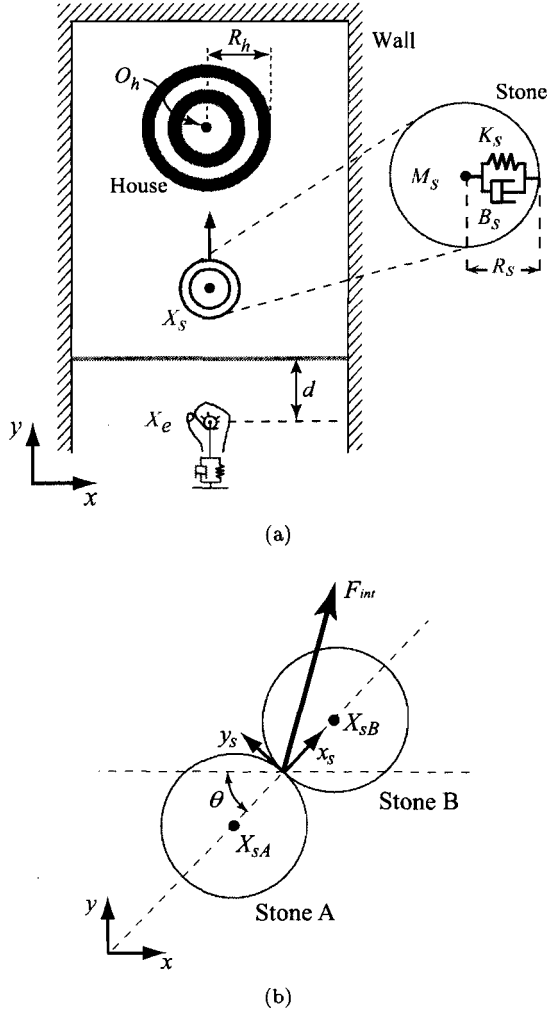


Fig. 3 Model of the virtual curling task

はストーンの慣性, $B_{floor} = \text{diag.}(b_f, b_f) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ はストーンと床の粘性摩擦である.

ストーンの重心位置 $X_s \in \mathbb{R}^2$ は, 訓練者の手先位置がリリースラインを越えるまでは $X_s = X_e$ とし, 通過後の挙動はリリース直前の手先速度をストーンの初速度として次式により計算した.

$$M_s \ddot{X}_s + B_{floor} \dot{X}_s = 0 \quad (2)$$

したがって, ストーンの停止位置は, リリース時の手先速度によって決定される.

なお, 壁との衝突時におけるストーンの運動は, x 軸に平行な壁に対しては速度ベクトルの y 成分を反転し, y 軸に平行な壁に対しては x 成分を反転するように設定した. そして, ストーン同士の衝突では, 衝突時に発生する相互作用力 $F_{int} \in \mathbb{R}^2$ を

$$F_{int} = \begin{cases} R^T(\theta) B_s R(\theta) \dot{X}_r + R^T(\theta) K_s R(\theta) dX_r & (0 \leq y \leq 2R_s) \\ 0 & (y > 2R_s) \end{cases} \quad (3)$$

で求め (Fig. 3 (b) 参照), (2) 式の右辺に加算して衝突後の

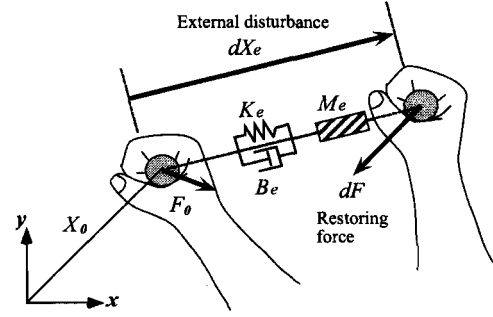


Fig. 4 Schematic description of the hand impedance

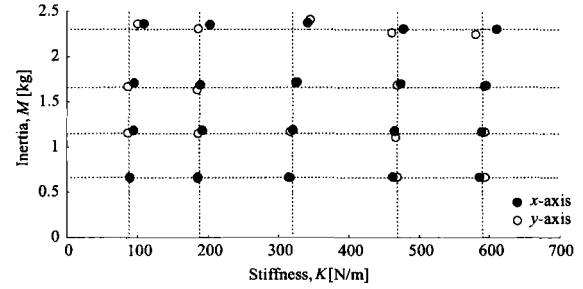


Fig. 5 Accuracy of estimated impedance parameters for the known spring-mass system

各ストーンの挙動を計算した. ここで, $X_r \in \mathbb{R}^2$ は各ストーン中心の相対位置ベクトル, $R(\theta) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ は絶対座標系からストーンの衝突点に設置した座標系への回転行列, $dX_r \in \mathbb{R}^2$ は衝突時刻 t_c 以後におけるストーンのめり込み量であり,

$$dX_r = \begin{cases} X_r(t) - |X_r(t_c)| \frac{X_r(t)}{|X_r(t)|} & (X_r \neq 0) \\ X_r(t) & (X_r = 0) \end{cases} \quad (4)$$

で求める.

2.3 手先インピーダンス計測

人間は作業目的に応じて運動を行なう際に突然姿勢を変化させるのではなく, その準備段階から筋を収縮させながらインピーダンスを変化させている^{11), 12)}. したがって, 運動直前や直後の姿勢保持状態における手先インピーダンスを推定することができれば, 人間がその作業に対してどのように筋を収縮させて自らの運動特性を調節しているかを推測することが可能となる.

いま, 人間が n 次元空間で上肢の多関節運動を行なっている場合を考える. Fig. 4 のようにハンドルを握って運動を行なっている訓練者の手先に外部から強制変位を加えたとき, 手先の運動特性は機械インピーダンスを用いて

$$M_e \ddot{X}_e(t) + B_e(\dot{X}_e(t) - \dot{X}_v(t)) + K_e(X_e(t) - X_v(t)) = -F_e(t) \quad (5)$$

と近似できる^{8), 9)}. ここで, $M_e, B_e, K_e \in \mathbb{R}^{n \times n}$ はそれぞれ手先の慣性, 粘性, 剛性であり, $X_v(t) \in \mathbb{R}^n$ は手先の仮想軌道, $X_e(t) \in \mathbb{R}^n$ は手先位置を表わす. また $F_e(t) \in \mathbb{R}^n$ は手先から環境に作用する力である.

上肢姿勢維持中は $X_v(t)$ が一定であるとする, 強制変位

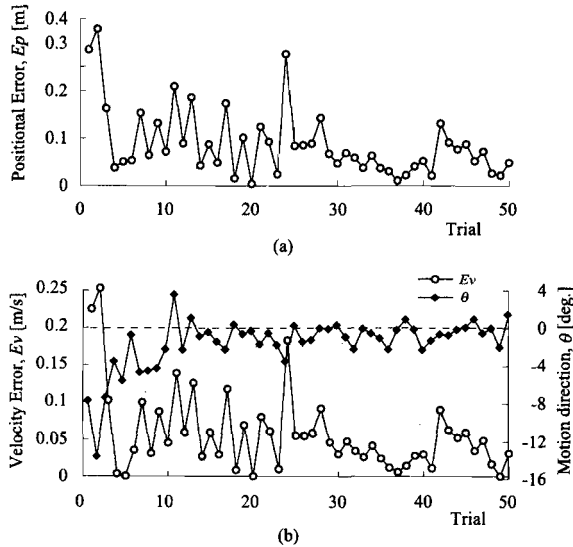


Fig. 6 Changes of the task performance with respect to the trial number

によって生じる手先位置と手先力の変化から,

$$M_e d\ddot{X}_e(t) + B_e d\dot{X}_e(t) + K_e dX_e(t) = -dF_e(t) \quad (6)$$

を得る. ただし, $dX(t) = X_e(t) - X_e(t_0)$, $dF_e(t) = F_e(t) - F_e(t_0)$ であり, t_0 は手先に強制変位を印加した時刻である. したがって, ある推定時間内で計測した手先位置 $X_e(t)$ と手先力 $F_e(t)$ を (6) 式に最小二乗法を用いてフィッティングすることにより, 手先インピーダンス M_e , B_e , K_e を推定することができる.

Fig. 5 は, 構築した仮想カーリングシステムのインピーダンス推定精度を確認するために実施した既知物理量に対する推定結果である. 実験では, 重りを付けたハンドルと固定環境の間にバネを設置し, 既知の剛性 (バネ定数) と慣性 (質量) を同時推定した. 図中の黒丸は x 軸方向, 白丸は y 軸方向の各 5 試行の平均値であり, 点線の格子点が設定した真値である. 剛性と慣性の推定値は真値に近いことから, 本システムは仮想カーリング作業における人間の手先インピーダンスを精度良く推定できることがわかる. なお, 剛性と慣性の推定実験における標準偏差は x 軸方向が 4.93 [N/m], 0.007 [kg] 以下, y 軸方向が 4.66 [N/m], 0.027 [kg] 以下であった.

3. 仮想カーリングタスクにおける手先運動特性

仮想カーリング作業に対する訓練規範と評価指標を設計するためには, 学習前後における手先運動特性を明らかにする必要がある. そこで本論文では, システムを操作した経験のない健常者 18 名 (21 才~24 才の男子大学生) により基礎訓練実験を行なった.

3.1 学習過程の解析

健常者が仮想カーリング作業に対してどのように熟練していくか, 各被験者に 50 試行を課してその学習過程を解析した. 実験では, 被験者に仮想カーリング作業の内容とハンド

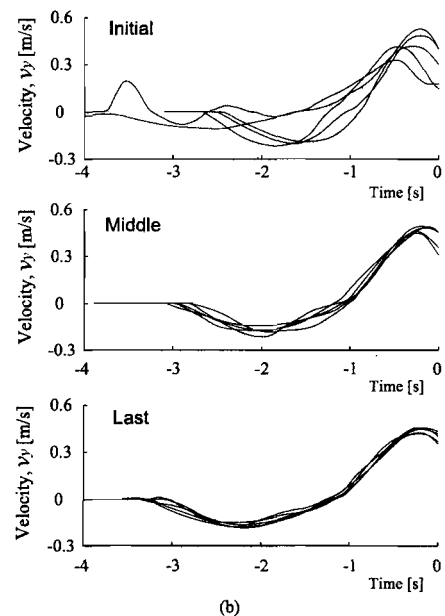
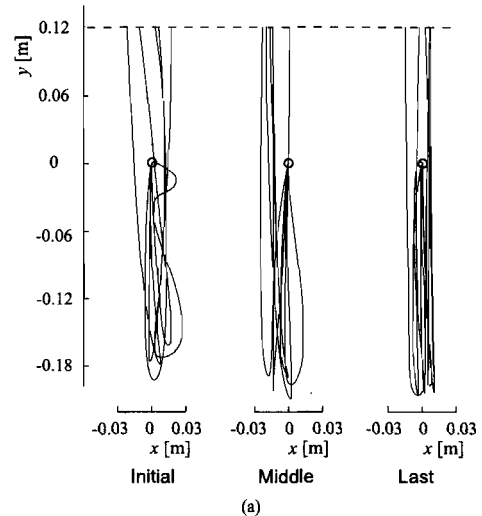


Fig. 7 Spatio-temporal characteristics of hand movements by Subject A during virtual curling task

ル操作の概略を説明した後, 肩関節と手先およびハウス中心が直線となるように装置正面に立たせて, ストーンをハウス中心に停止させるように指示をした. なお, 作業中の姿勢やハンドルの軌道については特に指定せず, 被験者がやりやすいようにさせた.

ハウスの中心と半径は $O_h = (0.0, 6.0)^T$, $R_h = 0.6$ [m], ハンドルの慣性と粘性は $m_r = 5$ [kg], $b_r = 1.0$ [Ns/m], ストーンの慣性と粘弾性は $m_s = 15$ [kg], $B_s = 100$ [Ns/m], $K_s = 10000$ [N/m], 床との粘性摩擦は $b_f = 1.0$ [Ns/m] と設定した. このとき, 訓練者のリリース時における y 軸方向の目標速度は, (2) 式より $y_e^* = 0.401$ [m/s] と求められる. そこで本論文では, ストーンの停止位置とハウス中心の位置誤差 E_p とリリース時の手先速度と目標速度との誤差 E_v を作業達成度の評価指標として用いた.

Fig. 6 は Subject A による評価指標 E_p , E_v およびリリー

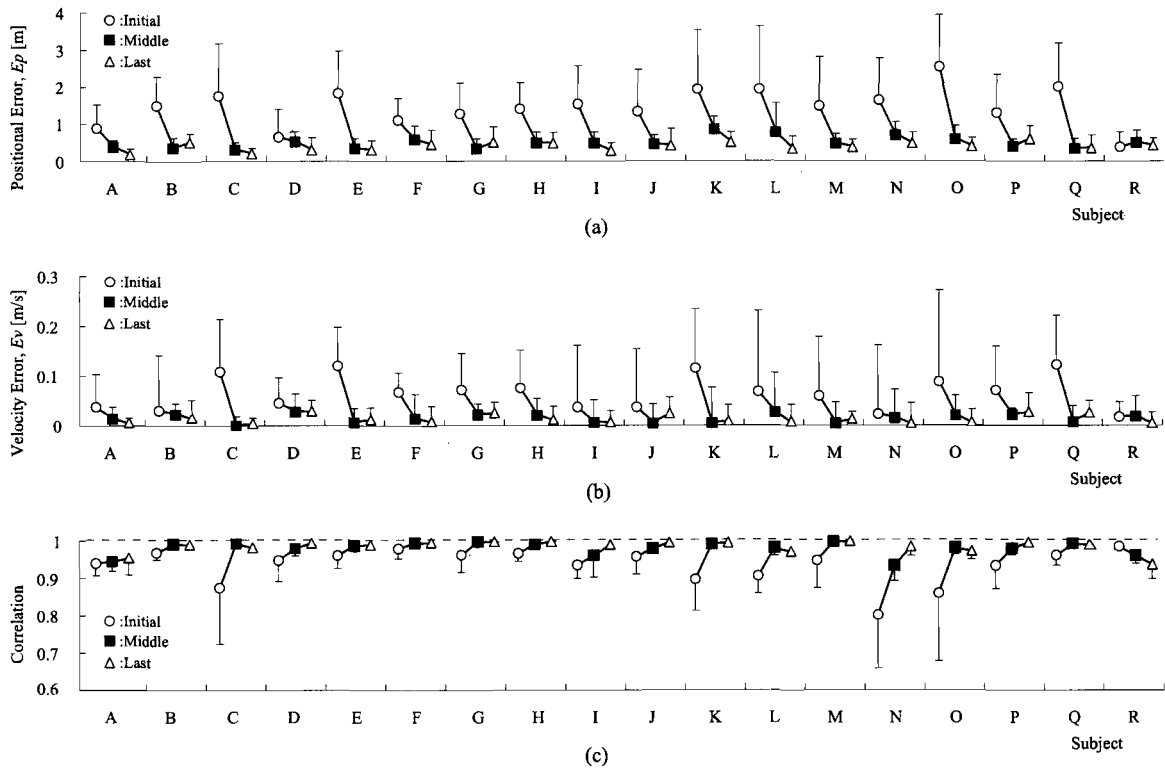


Fig. 8 Skill acquisition process of a virtual curling task for all subjects

ス時の手先運動方向 θ の試行回数に対する推移を示している。試行回数が進むにつれて被験者は真直ぐにストーンを押し出すようにハンドルを操作し、カーリング作業に熟練していくようすがわかる。Fig. 7 に訓練初期 (1~5 試行) と中期 (23~27 試行)、後期 (46~50 試行) における運動開始からリリースまでの手先軌道を示す。図 (a) は運動開始位置を原点とする手先の空間軌道、図 (b) はリリース時刻を $t = 0$ [s] とする y 方向への手先速度波形である。訓練初期では手先の空間軌道が左右に湾曲するなどばらつきが見られるが、試行回数の増加とともにハウス中心へ向かう直線軌道へと収束していくようすがわかる。手先速度波形に関しては、訓練初期では各試行に大きなばらつきを見せていたが、訓練が進むとともに速度波形は一定のパターンに収束し、リリース時の手先速度はストーンの目標初期速度に近づいている。Fig. 8 は全被験者による各期間における評価指標ならびに手先の平均速度波形に対する各試行の速度波形との相関であり、平均と分散を示している。多少の個人差は見られるが、同様な学習過程を全被験者に対して確認できる。

つぎに、仮想カーリング作業に十分熟練した被験者 3 名に対して、ストーンのダイナミクスは一定としてハンドル慣性を $m_r = 5, 10, 15$ [kg] と変化させて手先運動特性を解析した。なお、試行回数は各 20 試行とした。Fig. 9 に各被験者による最終試行時の y 方向への手先速度と手先力の時間波形を示す。ハンドル慣性に比例して被験者が発揮する手先力は大きくなっているが、手先速度波形はほぼ維持していることがわかる。すなわち、仮想カーリング作業において被験者は、

リリース前のハンドルとストーンが合体したダイナミクスではなく、リリース後に始めて知覚できるストーンのダイナミクスに適した手先速度波形を繰返し学習を通じて獲得しているのである。

3.2 インピーダンス調整能力

前小節の結果から、仮想カーリング作業において被験者は学習により獲得した手先速度波形を保持するために、自らの手先力を積極的に調節していることが明らかとなった。そこで、仮想カーリング作業に対する運動スキルを筋レベルから定量的に解析評価することを目的として、姿勢保持状態に近い運動開始直前、テイクバック時 (ストーンの投石動作に入る前の状態: 腕はほぼ静止している)、運動終了直後の計 3 点において各ハンドル慣性に対する手先インピーダンスを計測した。

Fig. 10 に Subject A による手先インピーダンスの計測結果を示す。図は、5 試行分の平均値と標準偏差である。被験者は作業中に y 方向の手先インピーダンス特性を積極的に変化させていることがわかる。テイクバック時には粘弾性を小さくすることでスムーズな手先運動の開始を実現しているものと考えられる。逆に運動終了直後は粘弾性を大きくすることで、伸びきった上肢姿勢がふらつかないようにしている。ハンドル慣性に対しては、運動開始直前では手先インピーダンスに顕著な変化は見られないが、テイクバック時と運動終了直後では特に y 方向の剛性と慣性を調節していることがわかる。多少の個人差は見られたが、ほかの被験者でも同様な傾向を確認できた。

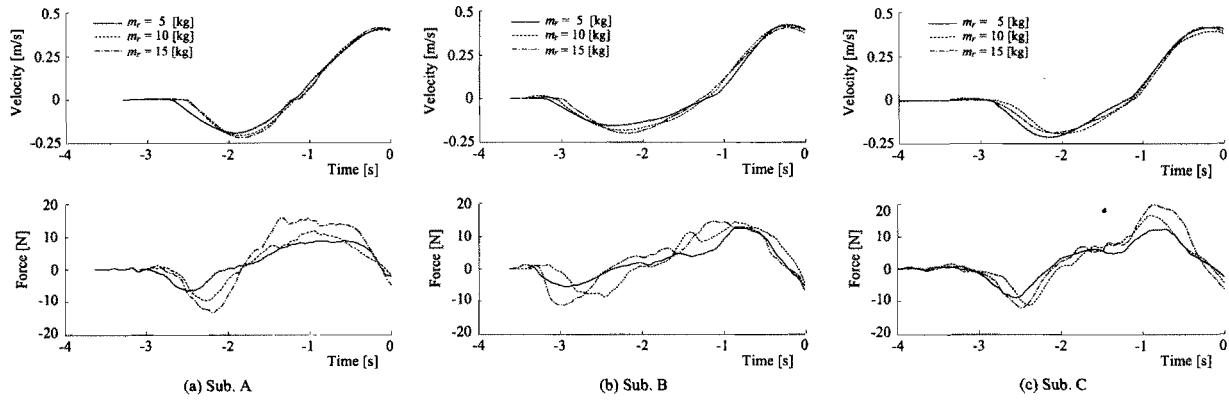


Fig. 9 Hand velocity profiles for the different inertia values of robot handle

Table 1 Natural angular frequency of hand motion by the subjects

| m_r [kg] | Before | | Take Back | | After | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| | ω_x | ω_y | ω_x | ω_y | ω_x | ω_y | |
| Sub. A | 5 | 9.58 | 18.02 | 11.64 | 12.49 | 12.19 | 25.52 |
| | 10 | 9.78 | 17.75 | 10.43 | 13.77 | 9.87 | 23.29 |
| | 15 | 10.53 | 16.97 | 9.65 | 14.08 | 10.17 | 20.57 |
| Sub. B | 5 | 14.56 | 14.82 | 14.63 | 11.55 | 10.80 | 17.75 |
| | 10 | 10.76 | 13.57 | 12.97 | 13.96 | 10.15 | 20.37 |
| | 15 | 9.53 | 14.69 | 11.68 | 14.28 | 10.14 | 22.12 |
| Sub. C | 5 | 9.81 | 13.29 | 13.33 | 10.53 | 8.82 | 17.12 |
| | 10 | 12.19 | 13.84 | 12.23 | 12.27 | 9.84 | 23.01 |
| | 15 | 12.86 | 15.92 | 12.14 | 13.22 | 9.90 | 24.76 |

[rad/s]

最後に、計測した手先インピーダンスから求めた各軸方向の固有角振動数の平均値を、Table 1 に示す。ここで、テイクバック時に着目すると、被験者は x 方向の固有角振動数を上げる一方で、 y 方向には小さくしていることがわかる。そして、ハンドル慣性が大きくなると x 方向の固有角振動数は小さく、 y 方向には大きくなる傾向が全被験者に共通して見られる。被験者はテイクバック時に溜めた力を、ストーンを前方に真直ぐ前方に押し出すために行なっているものと考えられる。このように仮想カーリング作業における手先インピーダンスを計測することで、訓練者の環境特性に対する適応能力の定量的な評価指標となりうる。

以上の実験結果より、仮想カーリング作業を通じて訓練者は ① 作業環境の特性を知覚する能力、② リリース後のストーン挙動をシミュレートして最適な手先軌道を計画する能力、そして ③ 作業目的を達成するために自らの運動特性を調節する能力という、人間の運動制御メカニズムを構成する基本能力の訓練を統合して行なえることが確認できた。

4. まとめと今後の課題

本論文では、生体運動感覚特性に基づく上肢運動訓練支援システムの実現を目的として、インピーダンス制御されたロボットと仮想現実感を活用して仮想カーリングシステムを開発した。そして、健常者 18 名による基礎訓練実験を行ない、仮想カーリング作業の学習過程における手先の空間・時間軌道の推移を明らかにするとともに、訓練規範となる手先速度

波形の特徴を明確にした。また、ハンドル慣性の変化に対する被験者の手先軌道と手先インピーダンスの関係から、仮想カーリング作業において健常者は石のダイナミクスに応じた手先速度波形を生成するように自らの筋骨格系を積極的に調整することを示した。

今後は、実用化に向けて本装置の機能をより拡張していくとともに、本論文で得た知見をもとにして訓練者の知覚能力、運動計画能力、運動制御能力に対する定量的な評価指標を考案していく予定である。そして、障害者の協力を得て提案システムを用いた訓練効果の解析をしていきたいと考えている。本研究におけるシステム開発にご協力くださいました神戸市立工業高等専門学校教授今村信昭先生、(株) エー・アンド・デイの皆様へ心から感謝いたします。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金 (15360226, 16760203) によるもので、ここに改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) H.I. Krebs, N. Hogan, M.L. Aisen and B.T. Volpe: Robot-aided Neurorehabilitation, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, **6-1**, 75/87 (1998)
- 2) H.I. Krebs, B.T. Volpe, M.L. Aisen and N. Hogan: Increasing Productivity and Quality of Care: Robot-aided Neuro Rehabilitation, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, **37-6**, 639/652 (2000)
- 3) 岡島, 田中, 長谷川, 内田, 木村, 富田, 堀内, 近藤, 榎: 関節可動域訓練装置: 柔らかさを与える機構の検討, *総合リハビリテーション*, **26-4**, 363/369, 医学書院 (1998)
- 4) 古荘, 坂口, 元田: ER アクチュエータを用いたリハビリテーション訓練システムの開発に関する基礎研究, *日本ロボット学会誌*, **19-5**, 612/619 (2001)
- 5) 古荘, 小柳, 片岡, 笠, 井上, 竹中: 三次元上肢リハビリ訓練システムの開発—第 1 報: ER アクチュエータを用いた機構およびシステム全体の開発—, *日本ロボット学会誌*, **23-5**, 629/636 (2005)
- 6) 古荘, 小柳, 片岡, 笠, 井上, 竹中: 三次元上肢リハビリ訓練システムの開発—第 2 報: 運動療法のためのソフトウェアの開発—, *日本ロボット学会誌*, **23-8**, 1011/1018 (2005)
- 7) F.A. Mussa-Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi: Neural, Mechanical and Geometric Factors Subservicing Arm in Humans, *Journal of Neuroscience*, **5-10**, 2732/2743 (1985)
- 8) T. Tsuji, P.G. Morasso, K. Goto and K. Ito: Human Hand Impedance Characteristics during Maintained Posture, *Bi-*

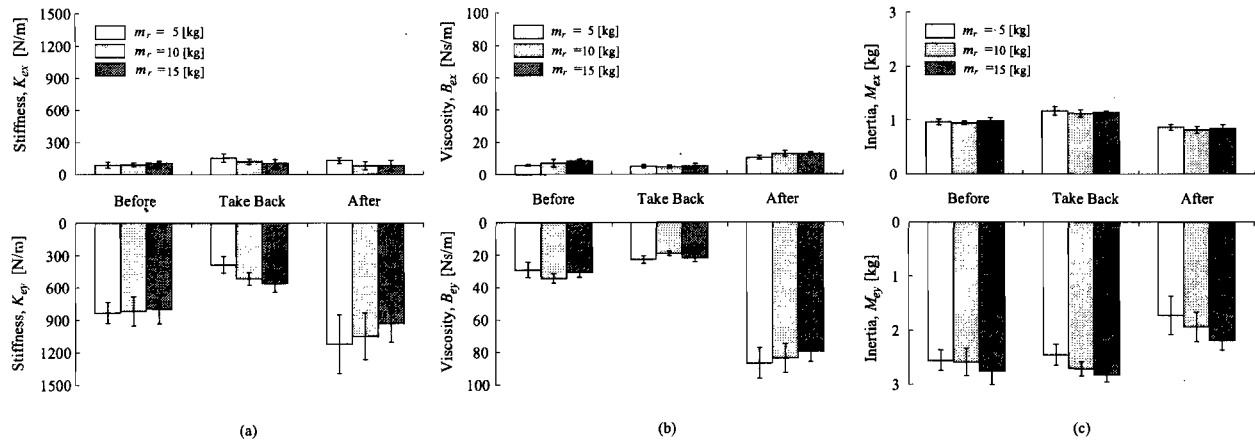


Fig. 10 Hand impedance parameters measured during tasks depending on the handle inertia

ological Cybernetics, **72**, 457/485 (1994)

- 9) 辻, 神字, 加藤, 金子, 川村: インピーダンス・トレーニング: 人間は手先インピーダンスを訓練により調節できるのか?, 計測自動制御学会論文集, **35-10**, 1300/1306 (1999)
- 10) T. Tsuji, Y. Tanaka, T. Abe and H. Miyaguchi: Human Impedance Perception through Sensory-Motor Integration, *Journal of Robotic and Mechatronics*, **15-2**, 192/199 (2003)
- 11) T. Tsuji, Y. Sumida, M. Kaneko and S. Kawamura: A Virtual Sports System for Skill Training, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **13-2**, 168/175 (2001)
- 12) T. Tsuji, Y. Takeda and Y. Tanaka: Analysis of Mechanical Impedance in Human Arm Movements using a Virtual Tennis System, *Biological Cybernetics*, **91-5**, 295/305 (2004)
- 13) Y. Tanaka, T. Tsuji and M. Kaneko: A Virtual Air Hockey System for Skill Training, *Proceedings of the 1st International Conference on Information Technology in Mechatronics*, 136/141 (2001)
- 14) N. Hogan: Impedance Control: An Approach to Manipulation, Parts I, II, III, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **107-1**, 1/24 (1985)

辻 敏夫 (正会員)



1959年12月25日生。85年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年広島大学工学部助手。94年同助教授を経て、2002年より同大学大学院工学研究科教授、現在に至る。工学博士。本会学術奨励賞(86)、論文賞(2002)、バイオメカニズム学会論文賞(90)、日本義肢装具学会論文賞(2000)、日本医科器械学会論文賞(2003)、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞(2004)、IEEE R&A Society The-K. S. Fu Memorial Best Transactions Paper Award(2004)などを受賞。人間とロボットの運動制御、生体信号解析、ニューラルネット、ヒューマン・マシンシステムなどの研究に従事。

[著者紹介]

田中良幸 (正会員)



2001年広島大学大学院工学研究科博士課程後期修了。同年5月広島市立大学情報科学部助手、2002年10月より広島大学大学院工学研究科助手、現在に至る。博士(工学)。主として、人間とロボットの運動制御、マン・マシンシステムに関する研究に従事。ロボット学会、日本人間工学会、IEEE等の会員。

松下和寛



1982年10月14日生。2007年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了見込み。主として、生体の運動解析に関する研究に従事。日本ロボット学会学生会員。