人間の手先位置制御の高速高精度化を目指したモジュール開発と基礎検討

山川 雄司^{*1,*2}, 遠山 渉^{*3}, 黄 守仁^{*3}, 村上 健一^{*3}, 石川 正俊^{*4}Module development and fundamental study toward
high-speed and high-accuracy positioning of human handYuji YAMAKAWA^{*1,*2}, Wataru TOOYAMA^{*3}, Shouren HUANG^{*3},
Kenichi MURAKAMI^{*3} and Masatoshi ISHIKAWA^{*4}^{*1} Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan^{*2} JST, PRESTO

4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

^{*3,*4} Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Received: 24 August 2017; Revised: 24 November 2017; Accepted: 23 January 2018

Abstract

Human motion is very flexible for performing various tasks but has low speed and low precision; therefore, support and assistance of human motion by robots is desirable in some situations. In this study, in order to achieve such functions, we developed a new portable module for accurately controlling the position of a human hand and constructed a high-speed, high-accuracy positioning control system using image tracking via a high-speed vision system. In order to evaluate its performance, we executed tracing tests of constant position, circular or linear trajectory. Finally, we performed the task of catching a falling small ball, as a significantly difficult positioning task. Although this task was nearly impossible to perform with the human hand alone, the success rate was dramatically improved by using the proposed method.

Keywords : Motion assistance, Robotic module, High-speed vision, Visual feedback

1. 緒 言

近年、工場での製品組立や微細作業、または医療における手術等の手先の細かい精密な作業が必要な場面で活躍するロボットが求められている。これらを実現するロボットには高速性と高精度性が要求され、これにより人間が行う作業を代替し作業効率の向上だけでなく、人間では実現が困難な精緻な動作の実現を可能にするが、決められた動作に限定されるという欠点がある。一方、人間はタスクに適応して運動するという柔軟性が利点であるが、動作の速度・精度が低いという問題点がある。図1に示すように、人間の動作をロボットが補助した上で人間が作業できれば、タスクに対して柔軟であり、かつ高速高精度な動作が実現できると考えられる。そこで本研究では、人間とロボットとの運動統合による作業の実現を目指して、人間が持てるサイズの手先位置制御モジュールの開発と、高速ビジョンを用いた位置制御システムの構築を行い、人間の手先運動機能の拡張（高速化と高精度化）を実現する。

Fig. 1 Concept of this research.

1.1 関連研究

人間とロボットとの協調作業に関する研究としては、人間とロボットの協調形態を分類する研究 (中内, 安西, 1992), (Kazerooni, 1993), (Kazerooni, 1995) や、協調システムのモデリングに関する研究 (池浦, 2000a), (池浦, 2000b) 等が行われてきた。また、人間と協調するロボットの持つべき機能やその用途についても考察されている (佐藤, 1996), (佐藤, 森, 1999)。

人間の動作を補助するロボットについても研究開発が行われている。例えば、人間の手先位置制御自体に関する研究としては、柴田らによる人間の位置決め精度が必要な上肢運動の特徴の抽出とその結果に基づく移動物体捕捉動作の生成が行われている (柴田他, 1993)。また、辻らによって、人間とロボットとの自然な協調作業を実現するための研究として人間-ロボット系の追従制御実験が行われたが、これはリニアアクチュエータによる 1 自由度運動のみである (辻他, 2000)。これらの研究を含む多くは人間の感覚運動系を超えるロボットではないため、人間の動作をリアルタイムに捉えて補償するものではない。また、手術の際に人間の手先位置を制御するためのロボットも開発されており、低侵襲心臓外科手術における心臓の拍動に対応するシステムとして、中村らによってモーションキャンセラーシステムが研究されている (Nakamura et al., 2001)。さらに、木口らによって身体が不自由な人の上肢運動を補助する車椅子型リハビリロボットも研究されている (Kiguchi et al., 2008)。

一方、人間が投げたボールをトラッキングし、そのボールを打ち返すバッティングするロボットアーム (Senoo et al., 2004) や自由落下するボールをキャッチするロボットハンド (Namiki et al., 2003) 等、高速なビジョンとマニピュレータを用いた人間を超える高速ロボットシステムに関する研究開発が行われている。また、これらの高速ロボットシステムを用いて布の動的折りたたみ操作 (Yamakawa et al., 2011) や結び目の生成 (Yamakawa et al., 2008) といった高い運動制御精度が必要な柔軟物操作も研究されている。しかしながら、これらはロボット単体での 1 kHz 高速視覚フィードバックを用いた動作生成や運動制御であり、人間の動作を補助するものではない。

これらの人間を超える高速ロボットシステムを人間を補助する形で応用できれば、人間の運動機能の向上に役立つと考えられる。図 1 に示すように、人間のタスクに対する柔軟性とロボットの高速性・高精度性を統合することにより、様々なタスクに適応し、かつ高速高精度でのタスク実現が可能になる。

1.2 目的

上記の背景を基に、本研究では、人間の動作補助の一例として、人間の手先位置を制御するモジュールの開発と、高速ビジョンを用いた高速高精度な制御システムの構築を目的とする (Tooyama et al., 2016)。特に、モジュールは人間が持ち運び可能なサイズを想定して作成する。開発したモジュールを用いて、人間単体では実現が困難な動作に対して、モジュールが人間の動作を補助することで達成させることを目指す。開発したモジュールを評価するために、ステップ応答により基本性能を評価するとともに、基本的なタスクとして定置制御、円軌道制御、直線軌道制御を行い、さらに具体的なタスクとして人間がランダムに動かしたモジュールで自由落下する微小物体のキャッチを行う。以上の動作は、運動制御の基本である位置決め的高速化と高精度化を支える基本的かつ重要な技術であり、本技術を活用しアルゴリズムを拡張することにより、様々な応用につながるものと考えられる。開発するモジュールは以下のような場面における課題も解決できると考えられる。

- 人間の視覚による手先制御では精密な位置決めが困難である。

Fig. 2 Developed two-degree-of-freedom module.

Fig. 3 Conceptual diagram of module control.

- 船上やビークル内では揺れが大きく、人間の姿勢が不安定になりやすく細かい作業が困難である。
- 人間は重大な場面において過度な緊張により動作にブレが生じる。

応用例としては、超精密作業、悪環境における作業や手術等での人間の手先位置補償が挙げられる。人間の粗動動作（対象位置へとアプローチと大まかな位置合わせ）とロボットの微動動作（高速高精度での位置合わせ）を分離して組み合わせることにより、高い柔軟性を維持したまま、高速性と高精度性を向上させることができる。既存のロボットは装着型のものが多いが、ユーザによってサイズを変えなければならないという課題がある。そこで、手に持って使用するタイプのモジュールであれば、どこへでも持ち運び自由で、ユーザに関わらず使用可能なため、高いユーザビリティも実現できる。

本論文の目的は、高速なビジョンとアクチュエータで構成されるモジュールによる人間の手先運動性能の向上の有効性を実証することであるため、基本的な構造にて基礎評価およびタスクの一例として微小物体のキャッチング実験を行っている。今後、得られた知見を基に、様々なアプリケーションに対して各種ハードウェアを開発し応用展開を目指す。

2. モジュール開発

人間の手先位置を補償するために、まず人間が持つことのできる、かつ人間の運動性能を超えるハードウェアが必要である。そこで、新しくロボットモジュールを開発した。開発したモジュールは、手先アクチュエータ、高速ビジョン、リアルタイムコントローラから構成されており、以下に各構成要素について述べる。

2.1 手先アクチュエータ

手先位置の制御を行うためのデバイスとして、図2に示すメカニズムを開発した。本機構のアクチュエータはACサーボモータとリニアアクチュエータから構成されており、それぞれの運動方向を直交させることで2自由度の運動を可能にしている。ストロークはそれぞれ95 mm (x方向)、72 mm (y方向)である。表1に軸の向き、各軸のアクチュエータとストロークに示す。本メカニズムの質量は、約1.5 kgである。

ACサーボモータにボールねじを装着し、モータの回転運動をボールねじが直線運動に変換することで前後方向（以下、x軸方向とする）の移動を実現した。使用したモータは安川電機のSGMPH-01B1A21、ボールねじはケーエスエスの3R-27140でリードは10 mmである。

ボールねじ上に互いの軸が垂直となるようにリニアアクチュエータを設置した。これにより左右方向（以下、y軸方向とする）の直線移動を実現した。使用したリニアアクチュエータはFAULHABERのSeries MCLM 3006である。

Fig. 4 Experimental setup.

Table 1 Specification of actuators

	Actuator	Stroke [mm]
x axis	Motor and ball-screw	95
y axis	Linear actuator	72

2.2 高速ビジョン

本研究では、手先位置をリアルタイムに認識し、高速な視覚制御系を構成するために高速カメラ Photron IDP-Express R2000 を使用した (Photron, 2017). 解像度は $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, フルフレームでの最大フレームレートは $2,000 \text{ fps}$ (frame per second) である. 本研究では、ロボットの制御周期が 1 ミリ秒 であることから、フレームレートを $1,000 \text{ fps}$ に設定した.

高速ビジョンは PC に接続されており、PC 内で画像処理 (3.1 節) を行う. 画像処理後のデータはイーサネットによりリアルタイムでコントローラに送信される.

2.3 リアルタイムコントローラ

モジュール制御系の概要図を図 3 に示す. リアルタイムコントローラには dSPACE を用い、イーサネットによる画像処理結果のデータ受信からアクチュエータへのトルク出力までが 1 ミリ秒 ごとに行われ、サンプリングレート 1 kHz で動作している.

2.4 実験システム

実験システムは図 4 に示すような構成であり、開発したモジュールに取り付けたマーカを真上から高速ビジョンで認識して、コントローラでモジュールの手先位置を制御している. 高速ビジョンはモジュール自体を動かしてもモジュール先端位置がトラッキングできるよう、モジュールの動作平面において $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 程度が見える高さに設置した. したがって、本実験環境では 1 pixel は実世界での約 1.17 mm に相当する. また、ビジョンと同位置から LED 照明を照射し、画像処理がし易いように照明の強度、レンズ絞り等を調整するとともに、モジュールの動作平面に焦点が合うようにレンズの焦点も調整した. 人間はモジュールを片手で持ち、トラッキング可能範囲内で x, y 方向にモジュールを動かし、 z 軸方向 (高さ方向) にはモジュールを動かさず各タスクを行った.

3. モジュールの手先位置の計測と制御

開発したモジュールを用いて、実際にタスクを実現するための手先位置の制御手法について説明する. その手法は高速画像処理技術を用いたモジュールの手先位置計測 (3.1 節) と、手先位置計測結果に基づくモジュールの運動制御 (3.2 節) に大別される.

3.1 高速画像処理による手先位置計測

高速画像処理による手先位置のトラッキング手法とモジュールの手先位置計測手法について説明する. 手先位置はタスクに必要なエンドエフェクタや、本論文では微小物体キャッチに必要な筒が取り付けられるため、モジュール

ルの各軸が交差する場所（マーカ 1）とリニアアクチュエータの右端（マーカ 2）に取り付けた再帰性反射材でできた 2 つの球をトラッキングすることにより手先位置を導出する。

3.1.1 マーカトラッキング

セルフウィンドウ法 (Ishii et al., 1996) を用いて、高速なマーカトラッキングを実現した。具体的な画像処理の手順は以下の通りである。

1. 反射球の検出と二値化 … 二値化画像の白色領域が反射球の位置に相当するため、この部分に ROI (Region of Interest) を設定・更新すると同時に重心位置の計算を行う。
2. ROI (Region of Interest) の設定 … それぞれの反射球の重心に対して、トラッキングに十分な領域の ROI を設定する（本研究では、21 pixel×21 pixel とした）。
3. 重心位置計算 … 二値化画像において設定した ROI から各反射球の重心位置を計算するために、画像モーメントを計算する。($p+q$) 次の画像モーメントは、

$$m_{p,q} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x,y) \quad (1)$$

と定義される。ここで x, y は画像中の座標であり、 $f(x,y)$ は画像中の各点における二値のいずれか（物体がある場所では 1、ない場所では 0）である。0 次モーメントである $m_{0,0}$ は物体の面積、1 次モーメントである $m_{1,0}$ と $m_{0,1}$ はそれぞれ x 座標、 y 座標の和を表し、物体の重心位置 (g_x, g_y) は

$$(g_x, g_y) = \left(\frac{m_{1,0}}{m_{0,0}}, \frac{m_{0,1}}{m_{0,0}} \right) \quad (2)$$

から求められる。

4. ROI の更新 … ROI の中心が重心位置 (g_x, g_y) と一致するように ROI を更新する。

これらを繰り返すことで計算量を抑え、高速なトラッキングを実現している。

3.1.2 手先位置計測

計測された 2 つのマーカの位置座標から手先位置を導出する。導出には以下の 2 つの拘束条件を仮定した。

1. 手先、マーカ 1、マーカ 2 の 3 物体は一直線上（リニアアクチュエータ上）に存在する。
2. 手先とマーカ 2 との距離は一定である。

マーカ 1, 2 の位置をそれぞれ $X_1(x_1, y_1)$, $X_2(x_2, y_2)$ とし、手先位置を $S(s_x, s_y)$ とすると、拘束条件より、

$$\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = \frac{y_1 - s_y}{x_1 - s_x} = \frac{y_2 - s_y}{x_2 - s_x} = a \quad (3)$$

$$(x_2 - s_x)^2 + (y_2 - s_y)^2 = L^2 \quad (4)$$

が成り立つ。ここで、 a, L はそれぞれ二値化画像上のリニアアクチュエータの傾き、手先とマーカ 2 との距離を表し、実測したところ、 $L = 154[\text{pixel}]$ であった。式 (3), (4) より手先位置は、

$$s_x = x_2 + \frac{L}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (5)$$

$$s_y = y_2 + \frac{aL}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (6)$$

となる。このように、2 つのマーカ位置 $X_1(x_1, y_1)$, $X_2(x_2, y_2)$ を計測することにより、式 (3) より a が計算され、式 (5), 式 (6) に $(x_2, y_2), a, L$ を代入することで手先位置 $S(s_x, s_y)$ が導出できる。目標位置も同様の方法で得られ、手先位置 S と目標位置をリアルタイムコントローラに送信する。

3.2 モジュールの手先位置制御

3.1 節から得られた手先位置 S と目標位置の情報を基に、手先位置を目標位置に制御するために PD 制御をリアルタイムコントローラに実装した。目標位置を $T(t_x, t_y)$ として、手先位置 S が目標位置 T に接近する方向に以下のトルクをモジュールの各アクチュエータに与えた。

$$\tau_x = -(K_{px}(s_x - t_x) + T_{dx}(\dot{s}_x - \dot{t}_x)) \quad (7)$$

Fig. 5 Tip position S in step response.

Table 2 PD control parameters.

Parameter	Value
x-axis proportional gain, K_{px}	0.08
x-axis differential gain, T_{dx}	0.10
y-axis proportional gain, K_{py}	0.10
y-axis differential gain, T_{dy}	0.50

Table 3 Overshoot and settling time in step response.

	x	y
Overshoot [%]	5.1805	0
5% settling time [s]	0.1005	0.1309

$$\tau_y = -(K_{py}(s_y - t_y) + T_{dy}(\dot{s}_y - \dot{t}_y)) \quad (8)$$

ここで、 τ_x, τ_y は x, y 各軸に与えるトルク、 K_{px}, K_{py} は x, y 各軸の比例ゲイン、 T_{dx}, T_{dy} は x, y 各軸の微分ゲインである。それぞれのパラメータ値を表 2 に示す。基本的には微分項は前フレームの画像情報との差より求めたが、x 軸方向の微分項 $\dot{s}_x$ にはモータエンコーダの微分値を用いた。これはビジョンの解像度では画像微分値に強いノイズが乗ってしまうためであり、モータの高いエンコーダパルス数を利用することで高速な運動物体に対しても滑らかな追従を可能にする。PD 制御を採用した理由としては、パラメータ調整が容易であることと、目標位置が時々刻々変化する制御に対しては I 動作は重要ではなく、速応性が重要となるためである。

3.3 応答性評価

システムの応答性を評価するために、位置のステップ入力を与えた際の手先位置の時間変化を計測し、オーバーシュートと整定時間を算出した。画像上の初期位置を (285, 254)、目標位置を (345, 314) とし、ステップ入力幅は x, y 軸ともに 60 ピクセル (約 70 mm, 1 pixel : 1.17 mm) とした。また、5 秒でステップ入力を印加した。

各方向のオーバーシュートと 5% 整定時間 (ステップ入力から $\pm 5\%$ の範囲に収束するまでの時間) を表 3 に示す。また、手先位置の時間変化を図 5 に示す。この結果より、約 0.1 秒で約 70 mm のステップ応答が可能であり、十分な高速性と高精度性を有していると考えられる。x 軸方向は立ち上がりが良好であり整定時間は短いですが、オーバーシュートが現れている。また、y 軸方向はオーバーシュートを生じていないことがわかる。これは、画像微分によるノイズの影響が大きいため、制御ゲインを上げられないことが考えられる。そのため、整定時間は長くなった。これらの応答については制御ゲインで調整可能である。

4. 基礎評価実験

構築したシステムの有効性を確認するために、ある場所に手先位置を留める定置制御とある軌道をなぞるように手先位置を制御する軌道追従について評価する。

Fig. 6 Tip position S in constant position control.

4.1 実験環境

本節では、基礎評価実験の実験環境について説明する。実験システムは図4に示す設定であり、操作者（20代男性）には以下の条件を付加して、各種実験を行った。

1. モジュールを手で持ち、テーブルより少しだけモジュールを浮かした状態（手がテーブルに触れない程度）にする。
2. モジュールの高さ方向の位置は変化させず、2次元平面内でモジュールを動かす。

4.2 定置制御

人間が手に持ったモジュールをランダムに動かした際に、手先位置を目標位置に固定するような制御を加えたときの手先位置座標を計測し、目標位置との x, y 各方向の距離差の二乗平均を計算した。この操作を5回繰り返し、5回の平均値を算出した。目標位置の画像座標は(305, 294)とした。一方、制御を加えず手先位置を目標位置に固定するように人間が持った場合についても同様に計測・算出を行い、結果を比較した。

5回の実験のうちの1回の実験結果を図6に示す。また、制御あり／なしの場合の誤差の平均値 (x 方向, y 方向) は $(0.93, 2.06) / (4.63, 4.07)$ であった。これらの結果から、制御なしの場合と比較して制御ありの場合の位置制御精度が高いことが確認できる。また、人間がランダムにモジュールを動かしても、モジュールの手先は定置に制御されていることから、モジュールを用いることにより人間の手先を補償できることが分かる。図6において、制御ありの場合は x, y 座標ともに目標位置付近を手先が行き来している。これは人間がモジュールをランダムに動かし目標位置から遠避けた際に、その向きによって制御方向が変わるためであり、これにより制御が効果的に働いていることが分かる。また、 y 軸ではステップ応答同様に画像微分のノイズの影響が見られる。

制御なしの場合、人間はランダムには動かしておらず定置に固定しようとしているため、ある微小区間（0.1秒間程度）で見た際の振動は制御ありの場合と大差はない。しかしながら、目標位置と一定の誤差を有する時間がある上、初期位置と最終位置に隔たりがある。これは、目標位置を自身の視覚から感覚的に定めているために、最初に確認した目標位置に固定しているつもりでも、実際には目標位置から微小にずれてしまう上に、時間の経過につれて一定方向に少しずつ移動してしまう、ということが原因と考えられる。

4.3 軌道追従制御

連続した軌道に対する軌道追従性を評価するために、基本的な軌道と考えられる円軌道と直線軌道の2パターンについて検証した。

4.3.1 円軌道

人間が手に持ったモジュールである円を1周描くように動かした際に、手先位置が精確な円軌道を描くように制御したときの手先位置を計測し、目標位置との各方向の距離差の二乗平均を計算した。この操作を5回繰り返し、

Fig. 7 Scheme showing the method for circular contour tracking.

Fig. 8 Trajectory of tip position S in circular contour tracking.

5回の平均値を算出した。一方、制御を加えず円軌道を描くように人間が動かした場合についても同様に計測・算出を行い、結果を比較した。

目標位置の計算は以下のように行った(図7)。描画すべき円(中心 $O(o_x, o_y)$ と半径 r) を定め、手先位置 $S(s_x, s_y)$ より目標位置 $T(t_x, t_y)$ を導出する。円中心 O と手先位置 S との距離 R は

$$R = \sqrt{(s_x - o_x)^2 + (s_y - o_y)^2} \quad (9)$$

より計算される。ここで求めた R を用いて、 $T(t_x, t_y)$ は

$$t_x = o_x + \frac{r}{R}(s_x - o_x) \quad (10)$$

$$t_y = o_y + \frac{r}{R}(s_y - o_y) \quad (11)$$

と導出される。以上のように目標位置 T を定めることで、手先位置が円軌道を描画するように制御可能である。

本実験では、 $O(o_x, o_y) = (256, 256)$ (画像の中心)、 $r = 50$ とした。また、二値化画像上には描画すべき円をディスプレイに映し、制御なしの場合には円と手先位置を目視しながらモジュールを動かした。手先位置の軌跡を図8に示す。また、制御あり／なしの場合の誤差の平均値は $(0.68, 0.98) / (4.28, 4.09)$ であった。この結果より、 x, y 軸ともに制御なしと比較して制御ありの場合のほうが高精度であると言える。制御ありの場合には一部にわずかな歪みはあるものの明瞭で滑らかな円の軌跡を描いている一方、制御なしの場合には人間が円を描画しているつもりであっても軌跡が滑らかでなく、目標軌道から大きくずれていることが確認できる。特に、奥から手前方向に引きながら描く半円に大きな歪みが生じている。以上より、モジュールを用いることで人間が描画するよりも精確な円軌道を描画することが可能であることがわかる。

4.3.2 直線軌道

人間が手に持ったモジュールで直線 $y = \alpha x$ 上を描くように動かした際に、手先位置が精確な直線軌道を描くように制御したときの手先位置を計測し、目標位置との各方向の距離差の二乗平均を計算した。この操作を5回繰り返し、5回の平均値を算出した。一方、制御を加えず直線軌道を描くように人間が動かした場合についても同様に計測・算出を行い、結果を比較した。

目標位置の計算は以下のように行った(図9参照)。目標位置 $T(t_x, t_y)$ は直線 $y = \alpha x$ 上に存在するから

$$t_y = \alpha t_x \quad (12)$$

Fig. 9 Scheme showing the method for straight line contour tracking.

Fig. 10 Trajectory of tip position S in straight line contour tracking.

である。また、直線 $y = \alpha x$ と線分 ST とが垂直となるように手先位置を補償するのが誤差の最短距離であり、その方向への補償が望ましいと考えられるため、

$$\frac{t_y - s_y}{t_x - s_x} = -1 \quad (13)$$

が成立する。式 (12), (13) より、 $T(t_x, t_y)$ は

$$t_x = \frac{1}{1 + \alpha} (s_x + s_y) \quad (14)$$

$$t_y = \frac{\alpha}{1 + \alpha} (s_x + s_y) \quad (15)$$

と導出される。以上のように目標位置 T を定めることで、手先位置が直線軌道を描画するように制御可能である。

実験では、 $\alpha = 1$ として、斜め 45° の直線を描くように設定した。二値化画像上には描画すべき線分を映し出し、制御なしの場合には直線と手先位置を目視しながらモジュールを動かした。実験では直線上の線分を 1 往復させた。手先位置の軌跡を図 10 に示す。また、制御あり／なしの場合の誤差の平均値は $(0.85, 0.85) / (4.89, 4.89)$ であった。この結果より、円軌道制御同様に、 x, y 軸ともに制御なしと比較して制御ありの場合のほうが高精度であると言える。制御ありの場合にはほぼ歪みがない明瞭な直線の軌跡を描いている一方、制御なしの場合は滑らかな直線とはなっていない。また、円軌道制御同様に、特に復路でモジュールを引きながら移動させる際に x, y 両方向ともずれが生じている。以上より、制御したモジュールを用いることで人間が描画するよりも正確な直線軌道を描画することが可能であることがわかる。

4.4 実験全体の評価

5 回行った実験のすべての結果および結果の平均値を表 4, 表 5 にまとめる。それぞれの表は x 軸, y 軸における画像内の目標値との位置誤差を示している。ここで、モジュールの稼働する平面内において、画像空間と実空間の対応は $1 \text{ pixel} : 1.17 \text{ mm}$ である。

全ての実験結果において、制御なしの場合と比較して制御ありの場合のほうが精度が高くなり、モジュールを用いることにより、50%~80%程度位置誤差を低減させることができる。また、いずれのタスクにおいても制御誤差が同程度であることから、人間の手先位置誤差をモジュールの視覚位置制御で補償し、モジュールの制御性能で手先位置を制御できることが明らかとなった。したがって、人間とモジュールとの協調による手先位置制御が可能であると言える。

制御ありの場合において、 x 軸と比べて y 軸の運動の誤差が大きくなった。これはリニアアクチュエータの PD 制御の D 動作において、微分入力画像微分値であるため、その微分値のノイズが影響していると考えられる。

Table 4 Error in x coordinate

Experiments	First	Second	Third	Fourth	Fifth	Average
Constant position control with module	0.88	0.94	0.94	0.89	1.01	0.93
Constant position control by a human subject	2.97	3.93	6.39	7.30	2.55	4.63
Circular contour tracking with module	0.72	0.67	0.68	0.65	0.68	0.68
Circular contour tracking by a human subject	4.91	4.51	3.58	3.70	4.68	4.28
Straight line contour tracking with module	0.81	1.00	0.67	0.82	0.96	0.85
Straight line contour tracking by a human subject	4.64	4.00	6.60	4.94	4.26	4.89

Table 5 Error in y coordinate (*This value is excluded in average calculation, because the actuator could not track the target due to the limitation of actuator movable range and this result is significantly different from other experiments.)

Experiments	First	Second	Third	Fourth	Fifth	Average
Constant position control with module	2.09	2.18	1.96	1.97	2.11	2.06
Constant position control by a human subject	4.17	3.60	3.09	6.04	3.43	4.07
Circular contour tracking with module	0.97	1.04	0.91	0.99	3.67*	0.98
Circular contour tracking by a human subject	4.13	3.87	3.37	3.93	5.17	4.09
Straight line contour tracking with module	0.82	1.00	0.67	0.81	0.96	0.85
Straight line contour tracking by a human subject	4.65	4.00	6.60	4.94	4.26	4.89

5. 微小物体キャッチ

モジュールを用いた具体的なアプリケーションとして、人間単独では実現が困難と考えられる微小物体キャッチを実現した。人間がモジュールをランダムに動かした際に、図4に示すパイプ（固定、高さ約0.7 m 地点）から自由落下する反射球（約10 mmの微小物体）をキャッチするという試行を10回行った。モジュールの性能を評価するために、あえてモジュールをランダムに動かした。一方、制御を加えず人間がモジュールを持って自力でキャッチしようとする試行も同様にを行い、結果を比較した。いずれの場合もパイプから時刻6秒付近でランダムなタイミングで反射球を落下させた。また、キャッチするためのモジュールの先端につけた筒の直径は約15 mmである。クリアランスが5 mmに対して、表4、表5のモジュール性能であることから、モジュールを用いることにより本タスクが実現可能になると考えられる。

実験結果は、10回の試行に対して、制御ありの場合が8回、制御なしの場合が0回という成功回数であった。制御ありの場合の実験のうち1回の実験結果について落下する反射球と手先位置との相対位置変化および各軸における時間変化を図11および図12に示す。さらに、そのときの連続写真を図13に示す（微小物体のキャッチ直前から瞬間までを0.02秒毎に抜き出したもの）。また、実験動画は著者らの研究室のwebページから見る事ができる(石川渡辺研究室, 2017)。手先位置が落下する反射球を追跡するようにモジュールが制御され移動していることが確認できる。なお、キャッチに成功しているにも関わらず x 座標の収束値に差が生じているのは、キャッチ直後に反射球は筒の外部へ抜ける仕組みになっているためである。なお、反射球が自由落下しているにも関わらず位置座標が2次元に変化しているのは、高速ビジョンが1台であるために、高さ方向の位置変化が高速ビジョンにおける2次元情報に影響を与えることによる。この影響は、特に図12(a)で見られ、モジュールの補償範囲外であるため、位置誤差が大きいことが分かる。

以上の実験結果から、制御なしの場合は筒と落下する反射球とを接触させることまでは可能だが、筒の中に入れてキャッチすることは困難となっている。モジュールの手先の初期位置が落下位置に近いことにより接触させることができても、落下時間が0.2秒程度と非常に短く、また高さが0.7 mあることにより位置合わせが困難であるために、人間の目で落下する反射球を追ってモジュールを動かしてキャッチすることは実質不可能である。一方、制御ありの場合は、落下開始時点で既に落下球のトラッキングと手先位置制御を開始しているため、落下につれて2次元情報が変化しても、常に追従するような手先位置の制御が実現されている。キャッチする瞬間もトラッキングしているため、落下球が筒と衝突し弾かれる、という事態が生じる可能性も低くなっている。

Fig. 11 Experimental result of catching task ($x-y$ plane).

(a) x coordinate

(b) y coordinate

Fig. 12 Time variation of the positions of the tip and the target in the case of catching with control.

Fig. 13 Continuous photos of catching task at every 0.02 s.

以上より、人間による実現が困難な「落下する微小物体をキャッチする」というタスクを、手先位置制御モジュールを用いて 80%の確率で実現できることが判明した。

6. 結 言

本論文では、ロボットの補助による人間の手先位置制御の高速高精度化を目的とし、高速ビジョンとアクチュエータから構成されるロボットモジュールの開発およびシステム構築を行い、システムの基本性能を評価するとともに、微小物体キャッチを実現した。本研究によって得られた知見として、以下の4点が挙げられる。

- 高速ビジョン、モータとボールねじ、リニアアクチュエータ、リアルタイムコントローラから構成される手先位置を高速高精度に制御するモジュールを開発し、実際に視覚フィードバックによって高速な手先位置制御が可能であることを確認した。
- モジュールの性能をステップ応答、定置制御、直線軌道制御、円軌道制御によって評価し、人間単独での位置制御よりも位置誤差を50%~80%程度低減することができる。
- モジュールが人間の動作を補償する性能を有しているため、人間とモジュールとの協調により高速かつ高精度での手先位置制御が可能である。
- 具体的なタスクとして自由落下する微小物体のキャッチング実験を80%の確率で成功した。

以上の結果から、開発したモジュールにより人間の手先位置を高速かつ高精度で補償することができるため、人間のタスクに対する柔軟性とモジュールによる精密性を利用することにより、多種多様なタスクに柔軟かつ高精度で対応できると考えられる。

今後は、2台の高速ビジョンを用いてモジュールの3次元位置を高速、高精度で計測すると同時に3次元位置制御を行い、モジュールの位置制御性能の向上を目指すとともに、モジュールの可動範囲の拡大や軽量化を図る。さらに、高速ビジョンを外部に設置するのではなく、モジュールに設置したメカニズムを検討していく。これらの課題を解決した上で、人間の動作に対してサポート・アシスト・機能拡張等が必要となる様々なアプリケーションに対して適切なハードウェアを開発するとともに、その有効性検証を進めていく。

謝 辞

本研究の一部は、JST、さががけ、JPMJPR17J9の支援を受けたものである。

文 献

- 池浦良淳, ロボット-人間協調システムのモデリング, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.3 (2000a), pp.331-336.
- 池浦良淳, 人間とロボットによる協調作業, システム/制御/情報, Vol.44, No.12 (2000b), pp.682-687.
- Ishii, I., Nakabo, Y. and Ishikawa, M., Target tracking algorithm for 1ms visual feedback system using massively parallel processing, Proceedings of the IEEE International Conference Robotics and Automation (1996), pp.2309-2314.
- 石川渡辺研究室, 人間の手先位置の高速高精度制御に向けた動作支援システム, available from <<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/MotionAssist/>> (accessed on 21 August, 2017).
- Kazerooni, H., A controller design framework for telerobotic systems, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.1, No.1 (1993), pp.50-62.
- Kazerooni, H., The human power amplifier technology at the University of California, Berkeley, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.34, No.4 (1995), pp.291-298.
- Kiguchi, K., Rahman, M. H., Sasaki, M. and Teramoto, K., Development of a 3DOF mobile exoskeleton robot for human upper-limb motion assist, Robotics and Autonomous System, Vol.56 (2008), pp.678-691.
- Nakamura, Y. and Kishi, K., Robotic stabilization assisting cardiac surgery on beating hearts, Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies, Vol.10, No.4 (2001), pp.205-208.
- 中内靖, 安西祐一郎, ヒューマン・群知能ロボット・インタフェースシステム-人間とロボットの協調について-, 計測と制御, Vol.31, No.11 (1992), pp.1167-1172.
- Namiki, A., Imai, Y., Ishikawa, M. and Kaneko, M., Development of a high-speed multifingered hand system and its application to catching, Proceedings of the IEEE International Conference Intelligent Robots and Systems (2003), pp.2666-2671.
- Photron, Photron IDP-Express R2000, available from <<http://www.photron.co.jp/products/image/realtime/idp-express.html>> (accessed on 21 August, 2017).

Yamakawa, Tooyama, Huang, Murakami and Ishikawa, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.84, No.858 (2018)

佐藤知正, 人間機械協調システム, 計測と制御, Vol.35, No.4 (1996), pp.262–267.

佐藤知正, 森武俊, 人と機械の知的協調システム—行動蓄積機能に基づいた人間行動適合型機械システム—, 計測と制御, Vol.38, No.6 (1999), pp.357–362.

Senoo, T., Namiki, A. and Ishikawa, M., High-speed batting using a multi-jointed manipulator, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2004), pp.1191–1196.

柴田論, 大場光太郎, 猪岡光, 位置決め精度が必要な人間上肢運動に関する実験的考察, 人間工学, Vol.29, No.5 (1993), pp.279–287.

Tooyama, W., Huang, S., Murakami, K., Yamakawa, Y. and Ishikawa, M., Development of an assistive system for position control of a human hand with high speed and high accuracy, Proceedings of 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (2016), pp.230–235.

辻敏夫, 加藤荘志, 金子真, 人間-ロボット系の追従制御特性, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2 (2000), pp.285–291.

Yamakawa, Y., Namiki, A. and Ishikawa, M., Motion planning for dynamic folding of a cloth with two high-speed robot hands and two high-speed sliders, Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2011), pp.5486–5491.

Yamakawa, Y., Namiki, A., Ishikawa, M. and Shimojo, M., Knotting manipulation of a flexible rope by a multifingered hand system based on skill synthesis, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2008), pp.2691–2696.

References

Ikeura, R., Modeling for cooperative systems of human and robot, Journal of Robotics Society Japan, Vol.18, No.3 (2000a), pp.331–336 (in Japanese).

Ikeura, R., Cooperative task by human and robot, Institute of systems, Control and Information Engineers, Vol.44, No.12 (2000b), pp.682–687 (in Japanese).

Ishii, I., Nakabo, Y. and Ishikawa, M., Target tracking algorithm for 1ms visual feedback system using massively parallel processing, Proceedings of the IEEE International Conference Robotics and Automation (1996), pp.2309–2314.

Ishikawa Watanabe Laboratory, Assistive system for high-speed and high-accuracy position control of a human hand using high-speed vision and actuator, available from <<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/MotionAssist/>> (accessed on 21 August, 2017).

Kazerooni, H., A controller design framework for telerobotic systems, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.1, No.1 (1993), pp.50–62.

Kazerooni, H., The human power amplifier technology at the University of California, Berkeley, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.34, No.4 (1995), pp.291–298.

Kiguchi, K., Rahman, M. H., Sasaki, M. and Teramoto, K., Development of a 3DOF mobile exoskeleton robot for human upper-limb motion assist, Robotics and Autonomous System, Vol.56 (2008), pp.678–691.

Nakamura, Y. and Kishi, K., Robotic stabilization assisting cardiac surgery on beating hearts, Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies, Vol.10, No.4 (2001), pp.205–208.

Nakauchi, Y. and Anzai, Y., Human and intelligent multi-robot interface system –towards cooperation of humans and robots–, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.31, No.11 (1992), pp.1167–1172 (in Japanese).

Namiki, A., Imai, Y., Ishikawa, M. and Kaneko, M., Development of a high-speed multifingered hand system and its application to catching, Proceedings of the IEEE International Conference Intelligent Robots and Systems (2003), pp.2666–2671.

Photron, Photron IDP-Express R2000, available from <<http://www.photron.co.jp/products/image/realtime/idp-express.html>> (accessed on 21 August, 2017).

Sato, T., Human machine cooperative system, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.35, No.4 (1996), pp.262–267 (in Japanese).

- Yamakawa, Tooyama, Huang, Murakami and Ishikawa, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.84, No.858 (2018)
- Sato, T. and Mori, T., Intelligent human-robot cooperative system –human behavior customizing system based on behavior accumulation–, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.38, No.6 (1999), pp.357–362 (in Japanese).
- Senoo, T., Namiki, A. and Ishikawa, M., High-speed batting using a multi-jointed manipulator, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2004), pp.1191–1196.
- Shibata, S., Ohba, K. and Inooka, H., Experimental study on human upper link point-to-point movements which require positioning accuracy, The Japanese Journal of Ergonomics, Vol.29, No.5 (1993), pp.279–287 (in Japanese).
- Tooyama, W., Huang, S., Murakami, K., Yamakawa, Y. and Ishikawa, M., Development of an assistive system for position control of a human hand with high speed and high accuracy, Proceedings of 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (2016), pp.230–235.
- Tsuji, T., Kato, T. and Kaneko, M., Tracking control properties of human-robot systems, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.18, No.2 (2000), pp.285–291 (in Japanese).
- Yamakawa, Y., Namiki, A. and Ishikawa, M., Motion planning for dynamic folding of a cloth with two high-speed robot hands and two high-speed sliders, Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2011), pp.5486–5491.
- Yamakawa, Y., Namiki, A., Ishikawa, M. and Shimojo, M., Knotting manipulation of a flexible rope by a multifingered hand system based on skill synthesis, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2008), pp.2691–2696.