

高速ビジュアルフィードバックによるフレキシブルアームの 先端位置制御

○ 高橋 考作, 清水 一弘, 平井 慎一
立命館大学ロボティクス学科

Tip position control of flexible arm by high-speed visual feedback

○ Kosaku TAKAHASHI, Kazuhiro SHIMIZU and Shinichi HIRAI
Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.

Abstract: This paper proposes a control law of tip position control of a flexible arm using 1000Hz high-speed visual feedback. Two-dimensional simulation using the virtual joint model is applied to the verification of the control law. We show that the high-speed and visual feedback is effective.

Keywords: High-speed vision, Flexible arm, FPGA

1 緒言

視覚センサによって制御対象の状態を制御周期と同期して認識できれば、高速運動する制御対象に対して簡単な制御則で制御が行えることが期待できる。そこで、本研究では、撮影速度 1000fps の高速ビジョンシステムを用いることによって、高速ビジュアルフィードバックによるフレキシブルアームの先端位置の制御を目指している。フレキシブルアーム制御の研究は制振制御などの直接ひずみフィードバック制御 [1] などの多くの研究がなされているが、本研究ではアームの先端位置を制御するというアプローチである。

本稿では、まず、FPGA を搭載した高速ビジョンシステムを用いてリアルタイムにアーム先端を検出する手法を述べる。次に、高速ビジュアルフィードバックによるフレキシブルアーム先端位置制御の制御則を提案し、シミュレーションによって検証する。

2 システム構成

本研究で構築した高速ビジュアルフィードバック制御システムを Fig.1 に示す。

本システムでは、制御対象であるフレキシブルアームを 1000fps の高速 CMOS センサで撮影し、FPGA を用いてアームの先端位置を検出する。FPGA にはユーザ領域が設けてあり、そこに本研究で設計するマーカ位置検出回路を実装する。制御プログラムが FPGA にアクセスし、フィードバックデータを取得する。破線で囲まれた部分は

画像技研製 ITL-HSC-AD-SDK であり、FPGA は Xilinx 社製 Vertex-II6000 を搭載している。

フレキシブルアームは厚さ 0.5mm、長さ 400mm、幅 20mm のパネ鋼 (SUP3) を用い、アームの端を減速機を介さずダイレクトにモータに繋がっている。モータは三菱電機製 HF-KP200 (AC200W サーボモータ)、ドライバアンプは同社製 MR-J3-20A1 (トルク制御モード) を使用する。制御は PC で行い、OS は Linux である。

3 ビジョン回路

本システムで用いている高速 CMOS センサは最大 1280×512 pixel の画像サイズを 1000fps で撮影することができる。この大量の画像情報を PC 上で処理を行う場合、PCI バスの転送速度がボトルネックとなり、リアルタイム性を確保できない。そこで、FPGA 上でマーカ位置検出を行い、制御に必要な情報のみを抽出することでリアルタイム性を実現する。

フレキシブルアーム先端位置の検出アルゴリズムは、マーカと背景の輝度の差を利用し、画像重心位置を計算することで検出する。

制御ソフトウェアからアーム先端位置情報を取得するために、ソフトウェアからは FPGA がメモリと同様に扱えるように設計している。設計方法は、架空のメモリアドレスを用意し、ソフトウェアからそのアドレスにアクセスしようとするとき FPGA 上の先端位置情報が保持されているレジスタ値を返すことで実現する。

4 シミュレーション

アーム先端位置をフィードバックすることによって得られる効果の検証のために C 言語を用いてシミュレーションを行った。アームの先端位置制御は、 θ_e を鉛直下向き ($-\pi/2$ rad) から目標角の水平方向 (0rad) に制御するものである。なお、アームの角度は Fig.2 に示すように定める。

フレキシブルアームをシミュレーションするにあたって、吉川らが提案した仮想受動関節を用いたモデリング手法 [2] を用いた。これは、フレキシブルアームを幾つかの剛体リンクとして各関節にはフレキシブルアームに一致す

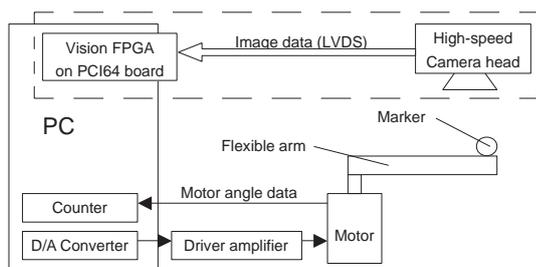


Fig. 1 High-speed visual feedback control system

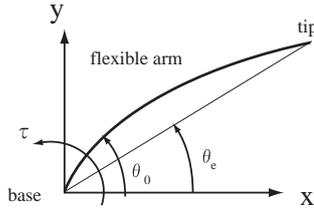


Fig. 2 Control of flexible arm

るようにバネ・ダンパを設計する方法である．また，任意関節数でシミュレーションが行えるようにニュートン・オイラー法を用いて逆力学計算を行っており，数値計算には4次のルンゲ・クッタ・ギル法を用いている．空気抵抗を近似的に関節ダンパ要素として使い，実際の板バネとのキャリブレーションを行った．なお，シミュレーション刻み時間は0.2msec，制御周期は1msecである．

まず，振動抑制のないbasePD制御とtipPD制御での制御を考える．式(1)で示すbasePD制御は剛体を対象とした場合の一般的なPD制御である．式(2)に示すtipPD制御は先端角度 θ_e を目標角に近づけるようにした制御則である．更に， $\dot{\theta}_0$ を用いてダンパとしている．この二つの制御則のシミュレーション結果をFig.3,4に示す．

$$\tau_{base} = K_p^0 \cdot (\theta_d - \theta_0) - K_d^0 \cdot \dot{\theta}_0 \quad (1)$$

$$\tau_{tip} = K_p^e \cdot (\theta_d - \theta_e) - K_d^0 \cdot \dot{\theta}_0 \quad (2)$$

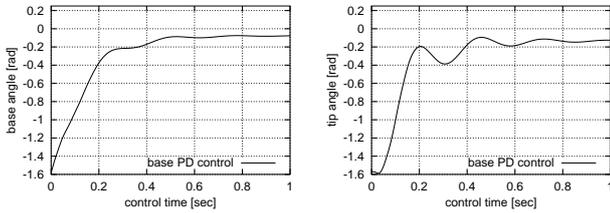


Fig. 3 results of basePD control law ($K_p^0 = 1.00, K_d^0 = 0.145$)

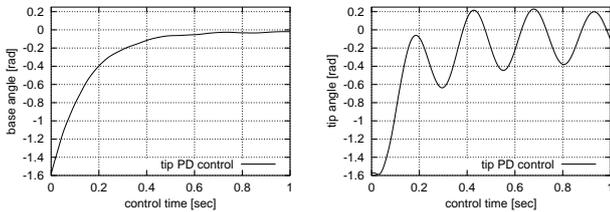


Fig. 4 results of tipPD control law ($K_e^0 = 1.00, K_d^0 = 0.145$)

Fig.3,4からわかるように，両制御則について振動が収まらないことがわかる．さらに，アームの先端角度 θ_e を制御するためにはtipPD制御が望ましいと考えられるが，basePD制御よりも振動が大きくなっている．この原因は，フレキシブルアームのしなりによってトルク入力の位相が遅れていることに起因している．

このtipPD制御における振動を抑えるために，アームしなりを無くすように働く要素 $K_p^{str}(\theta_d - \theta_e)$ を追加する．式3に示す制御則でのシミュレーション結果をFig.5に示す．さらに，アーム先端の定常偏差を無くすために積分項を追加する．式4に示す制御則でのシミュレーション結果をFig.6に示す．

$$\tau_{PD+P} = \tau_{tip} + K_p^{str} \cdot (\theta_d - \theta_e) \quad (3)$$

$$\tau_{PD+PI} = \tau_{PD+P} + \int_0^t (\theta_d - \theta_e) dt \quad (4)$$

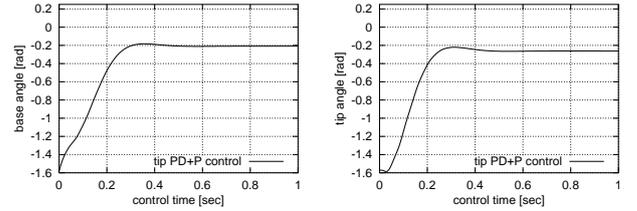


Fig. 5 results of tipPD+P control law ($K_p^e = 1.00, K_d^0 = 0.145, K_p^{str} = 3.50$)

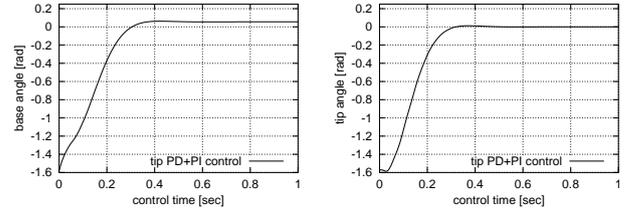


Fig. 6 results of tipPD+PI control law ($K_p^e = 1.00, K_d^0 = 0.145, K_p^{str} = 3.50, K_i^e = 1.21$)

Fig.5に示すように，アーム先端の振動が起きずに制御できていることがわかる．さらに，Fig.6では先端角度を振動を起さずに目標角度に収束できていることがわかる．以上より，フレキシブルアームの制御において高速ビジュアルフィードバック制御が有効であることが分かる．

5 結言

本稿では，高速ビジュアルフィードバックによるフレキシブルアームの先端位置制御を提案し，簡単な制御則(tipPD+PI)でフレキシブルアームを制御できることをシミュレーションによって示した．今後，ビジョナルアルゴリズムをFPGAに実装し，実機での検証を行う予定である．

謝辞

本研究の一部は，立命館大学21世紀COEプロジェクト「マイクロ・ナノサイエンス・集積化システム」による．

参考文献

- [1] 羅・山本：ゲイン適応によるフレキシブルロボットアームのひずみ直接フィードバック制御，日本機械学会論文集中(C編)，49巻，566号，pp.240/244(1993)．
- [2] 吉川・田村：フレキシブルアームに対する仮想受動関節モデルの有効性の検討，日本ロボット学会誌，Vol.17，No.2，pp.250/259(1999)．