

機関番号：33302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760283

研究課題名(和文) 視触覚フィードバック制御による医療用ロボットの高性能化に関する研究
 研究課題名(英文) A Study of Passivity-based Visual Force Feedback Control for Eye-to-hand Systems

研究代表者

河合 宏之 (KAWAI HIROYUKI)

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70410298

研究成果の概要(和文)：本研究では平行リンク機構を有するロボットマニピュレータの視覚フィードバック制御と、固定カメラ構造の3次元視触覚フィードバック制御について考える。従来研究にて提案されていた視覚フィードバック制御と力制御を融合することで、視触覚フィードバック制御則を提案し、構成した視触覚フィードバックシステムが受動性を有することを示した後、安定性解析をおこなった。そして、シミュレーションと実験により提案手法の有効性の検証をおこなった。

研究成果の概要(英文)：This study investigates both passivity based visual feedback control for parallel link manipulators and passivity based visual force feedback control for eye-to-hand systems. The main contribution of this study is to show that the visual force feedback system has the passivity which allows us to prove stability in the sense of Lyapunov. Finally simulation and experiment results are presented to verify the stability of the visual force feedback system and understand our proposed method simply.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御工学, 知能ロボティクス, 視覚情報, 触覚情報, 機械力学・制御

1. 研究開始当初の背景

産業用ロボットに代表されるロボットが研究されはじめてから、およそ半世紀が経過し、その技術は成熟期にはいつているともいわれている。最近では、その高い技術を集約することで実現される医療用の手術支援ロボット、2足歩行ロボットやペットロボットなど、産業界以外での活躍が目立ち始めてきている。特に、医療用ロボットは実際の手術での利用がみられ、実用化の域にまで達して

いる。しかし、産業用ロボットをはじめとするロボット分野において日本の産業界の技術力が高いことは周知の事実であるが、医療用ロボットに関しては海外に遅れをとっているのが現状である。例えば、Intuitive Surgical社のda VinciやZeus(旧Computer Motion社)が有名であるが、どちらも米国の企業が製作した手術支援ロボットである。

その理由として、本国が定める手術支援ロ

ロボットを実際の手術に使用するために課せられた安全性や耐久性の基準が厳しい事もあるが、日本の産業界が高い技術力を有している反面、その裏づけをする理論的な研究や体系付けられた学問としての成熟度が不十分であることも理由のひとつとして挙げられる。そこで、医療の分野において活躍が期待される産業界の技術力をより高めていくためには、現状では不十分とされる学術的なアプローチによる研究が必要とされており、理論的な裏づけをされたロボットの機構や制御系設計の提案が期待されている。なかでも、患者の体を極力傷つけない低侵襲手術を支援する医療用ロボットは、最先端の制御技術を必要とするロボットと位置づけられる。特に、手術中の視野を確保するための視覚センサと、鉗子が手術部位に触れた際にその感覚を術者に返すための触覚センサが重要であり、近年ではシステムの高性能化を図るために視覚センサと触覚センサを併用することが必要となってきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、腹腔鏡把持ロボットと同じ構造の平行リンク機構を有するロボットを、視覚情報と触覚情報を用いることで高性能化・ロバスト化することにある。そのため、まずは従来研究で得られている視覚フィードバック制御の設計手法を腹腔鏡把持ロボットへ適用し、術者の望む視野を自動的に確保することを試みる。つぎに、視覚と力・触覚を融合するための準備として、よく知られるアーム機構のロボットにおいて視覚フィードバック制御による制御系設計法を提案する。そして最終的には、平行リンク機構を有する腹腔鏡把持ロボットにおいて視覚と力・触覚を融合したシステムを構成し、視覚情報と触覚情報に基づく制御系設計法を提案する。提案する制御アルゴリズムを三次元シミュレーションと実システムに実装することで、理論値と実験データの両面から設計法の性能評価および検証をおこなう。

3. 研究の方法

研究目的に対し本研究の柱は、①平行リンク機構を有するロボットの制御と②ロボットの視覚フィードバック制御の2つにわけることができる。まずは腹腔鏡把持ロボットを視覚フィードバックシステムと捉え、数学的にモデリングすることから考える。腹腔鏡が術者の視野を自動的に確保するために鉗子の先端を観測対象とし、カメラの透視変換を経た観測であることと、腹腔鏡把持ロボットのリンク座標間の変換を考え合わせることで、カメラモデルを導出する。またカメラを用いた画像計測においては、さまざまなパラメータの誤差や離散化の影響などにより

モデルに不確かさが存在する。したがって、不確かさが存在する場合でも術者の視野を確保し、腹腔鏡把持ロボットに対して望ましい追従特性を達成するロバストな制御則の設計問題を考える。設定された制御目的を満足するように、制御系設計をおこなう。まず、ロボットマニピュレータのダイナミクスにおいて、トルク入力から関節角速度出力に対し受動性と称される興味深い性質がすでに知られている。この性質に着目することにより、系のエネルギー関数を自然に定義することが可能となる。腹腔鏡把持ロボットは安全性のために平行リンク機構を有しているため、エネルギー関数の整形が重要となる。特に、カメラ重量の変化に対してロバスト性を有することを示す。

つぎに、ロボットやカメラに患者の体や鉗子が触れることで生じる外力を考慮するために、力・触覚をフィードバックループに組み込みモデリングすることを考える。腹腔鏡把持ロボットでは、視覚情報により術者の操作する鉗子の先端を、常時カメラが捕らえることで術者の視野を確保する。そして、力・触覚が加わった際に制御手法を切り替えることを考える。この数学的記述により、視覚と力・触覚を有するシステムの制御系設計を考え、その安定性や制御性能の解析をおこなう。そして、腹腔鏡把持ロボットの視覚フィードバック制御に力制御を融合したシステムの制御系設計をおこなう。なかでも、システムの有するエネルギー関数を用いて設計をおこなう手法に着目することで、腹腔鏡把持ロボットにおける視覚フィードバック制御と力制御を、受動性により得られるエネルギー関数で結び付けることが可能となる。最後に、シミュレーションと実験により提案する手法の有効性を検証する。

4. 研究成果

本研究における研究成果うち①平行リンク機構を有するロボットの制御と②ロボットの視覚フィードバック制御の主要な結果について示す。詳細に関しては「5. 主な発表論文等」で挙げる雑誌論文と学会発表を参照されたい。

(1) 平行リンク機構を有するロボットの制御 ①モデリング

Fig.1 に示すような平行リンク機構を有するロボットの手先にカメラを取り付けた視覚フィードバックシステムについて考える。透視変換を時間微分することでえられるカメラダイナミクスとマニピュレータダイナミクスを併せることで視覚フィードバックシステムを構成する。このとき、カメラの重量の変化をマニピュレータのパラメトリックな不確かさと捉え、明示的に表現することで不確かさに対してロバストな制御則の提

案が可能となる。

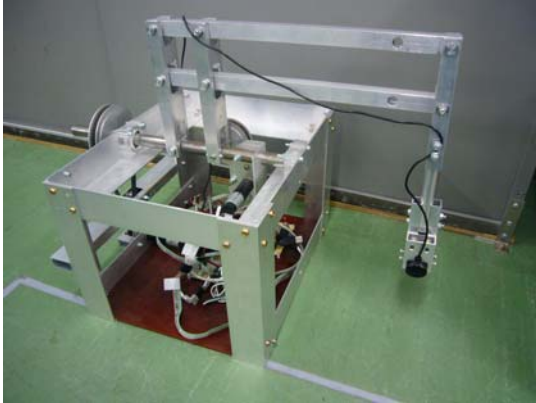


Fig. 1 平行リンク機構を有するロボットの視覚フィードバックシステム

②制御則の提案

このシステムの制御目的は、マニピュレータの手先を観測対象に追従させること、すなわち観測対象を画像面の中心でとらえるようにマニピュレータを動かすことである。そこで、関節角速度の目標値を視覚情報より生成し、また画像平面上での偏差を直接フィードバックするような制御則を構成する。ここで提案する制御則は画像ベース法に大別される方法となっている。マニピュレータの運動エネルギーと視覚情報から構成される(ポテンシャル)エネルギーを考えると、提案する制御則を用いた視覚フィードバックシステムが受動性を有することが示される。

③安定性解析

カメラの質量が既知すなわちパラメトリックな不確かさが存在しないとの仮定のもとでは、受動性を示す際に用いたエネルギー関数をリアプノフ関数と考えることで、リアプノフの安定定理に基づき、平衡点の漸近安定性が示される。また、パラメトリックな不確かさが存在する場合は、リアプノフの安定定理に基づき、平衡点の一様終局有界性が示される。

④実験結果

提案する制御則における実験結果を Fig. 2 と Fig. 3 に示す。Fig. 2 は不確かさを考慮していないノミナル制御における実験結果を、Fig. 3 は不確かさを考慮したロバスト制御における実験結果を示している。両図とも観測対象が運動した場合の画像面上での観測対象の軌跡を表しており、軌跡が原点付近に留まっていればカメラ視野の中心で観測対象を捉えている理想的な状態となる。比較のためロボットを静止させた場合の観測対象の軌跡を示したものが外側の青線である。ロボットを制御していない場合は、観測対象はカメラ視野の端に映ることになる。これに

対して Fig. 2 と Fig. 3 の提案する制御をおこなった場合は、観測対象を画像中心で捉えているのが確認される。特に Fig. 2 のノミナル制御では、100[pixel]程度画像中心からずれる場合があるのに対して、Fig. 3 のロバスト制御では画像中心から ± 50 [pixel]程度に抑えられていることから、提案手法の有効性が確認される。

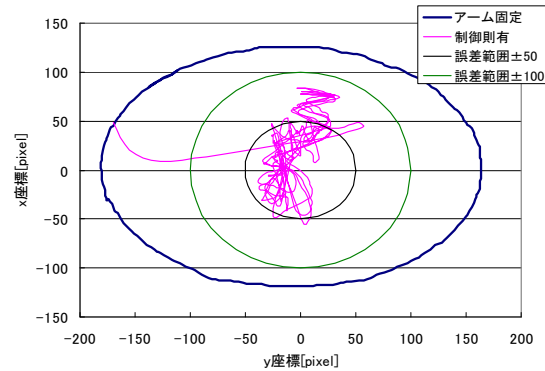


Fig. 2 ノミナル制御における画像面上での観測対象の軌跡

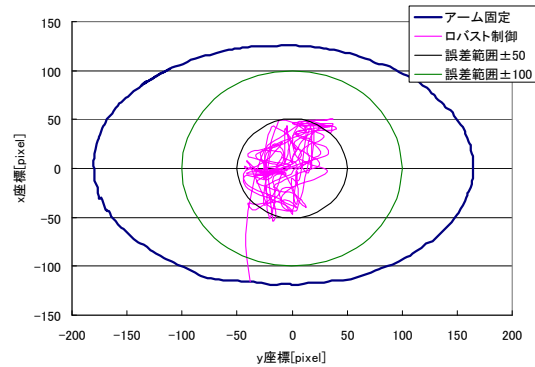


Fig. 3 ロバスト制御における画像面上での観測対象の軌跡

(2) ロボットの視触覚フィードバック制御

①モデリング

Fig. 4 に示すような3自由度ロボットアームの手先に力センサを取り付け、ワークスペースの上部にカメラを配置した視触覚フィードバックシステムについて考える。基準座標系、手先座標系、カメラ座標系および観測対象座標系の四つの座標系を定義し、カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢を同次表現を用いて表す。この相対位置姿勢はカメラからは直接得られないが、オブザーバを構成することで制御則に用いることが可能となる。

一方、接触力に関してはマニピュレータの手先が観測対象に接触する際の手先拘束を考慮し、関節空間から接触面への射影行列を考える。このとき、マニピュレータの目標関節角速度および目標関節角加速度を接触力の偏差と視覚情報における偏差を含むよう

に構成する．これにより視覚と触覚を含む視覚触覚フィードバックシステムを構成可能となる．

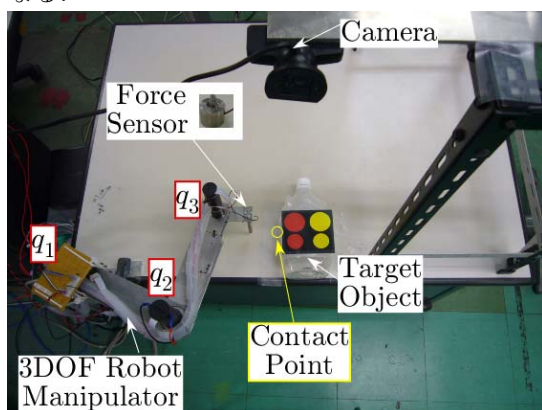


Fig. 4 3自由度ロボットアームの視触覚フィードバックシステム

②制御則の提案

制御目的は位置姿勢が未知の対象物に対して、与えられた接触力で手先を適切に接触させることである．そのため、マニピュレータの速度偏差、接触力の偏差、視覚情報に関する偏差およびオブザーバにおける推定偏差が 0 となるような制御則を提案する必要がある．視覚情報における偏差と推定偏差から構成される(ポテンシャル)エネルギーを考えると、視触覚フィードバックシステムが受動性を有することが示される．本研究ではこの受動性に基づく制御則を提案している．

③安定性解析

観測対象が静止している場合、受動性を示す際に用いたエネルギー関数をリアプノフ関数と考えることで、リアプノフの安定定理に基づき平衡点の漸近安定性が示される．従来の受動性に基づく位置と力・触覚のハイブリッド制御では対象物の位置姿勢は既知とされていたが、本研究で提案する受動性に基づく視触覚フィードバック制御では未知な位置姿勢でも接触を可能としている．特に、手先の速度を関節空間から接触面への射影行列を用いて表し、マニピュレータダイナミクスを含む力制御における偏差システムと視覚フィードバックシステムを結合したことで、受動性および安定性の議論が可能となっている．

④実験結果

提案する制御則における実験結果を Fig. 5 と Fig. 6 に示す．Fig. 5 と Fig. 6 はそれぞれ視覚情報に関する偏差と接触力を表している．Fig. 5 は、x 軸と y 軸の並進および z 軸の回転を表しており、0 に収束していることから、視覚情報を用いて相対位置姿勢が目標位置姿勢に一致することが確認される．

Fig. 6 において、3.62 [s] 付近で接触力が急激に変化しているのは、手先が対象物に接触した瞬間を表している．その後、時間の経過とともに接触力が目標値 5 [N] に収束していることが確認される．以上により、提案する手法において位置姿勢が未知の対象に対して与えられた接触力で手先を適切に接触されていることが実験によって確認された．

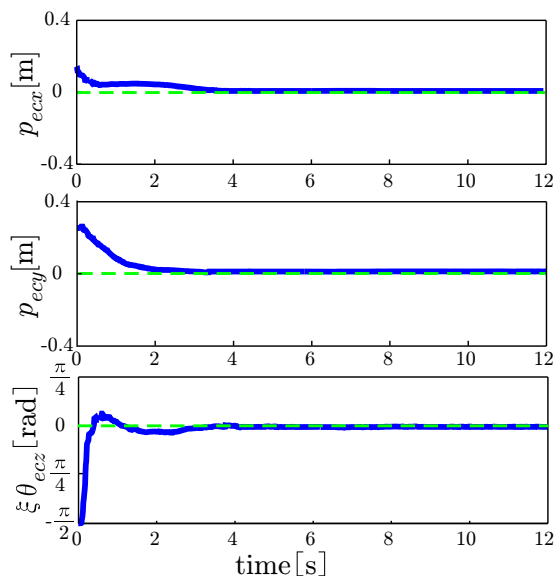


Fig. 5 視覚情報に関する偏差

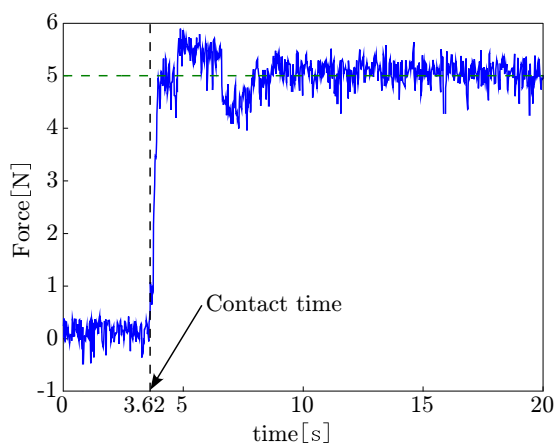


Fig. 6 接触力(目標接触力 5 [N])

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① H. Kawai, T. Murao and M. Fujita, Passivity-based Visual Force Feedback Control for Eye-to-Hand Systems, A. Lazinica and H. Kawai(Eds.), Robot Manipulators, New Achievements, IN-TECH, 査読有, pp. 329-342, 2010.

- ② 河合宏之, 村尾俊幸, 藤田政之, 受動性に基づく固定カメラ構造の3次元視触覚フィードバック制御, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.22, No.7, pp.273-279, 2009.
- ③ T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Passivity-Based Control of Dynamic Visual Feedback Systems with Movable Camera Configuration, Electronics and Communications in Japan, 査読有, Vol.92, No.6, pp.1-11, 2009.
- ④ 村尾俊幸, 河合宏之, 藤田政之, 固定カメラシステムに対する安定化予測ビジュアルフィードバック制御, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol.129, No.4, pp.630-638, 2009.

[学会発表] (計7件)

- ① 増田大樹, 河合宏之, 小林伸明, 平面3自由度マニピュレータの視触覚フィードバック制御, 平成22年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2010年9月12日, 福井県, 福井工業高等専門学校
- ② H. Kawai, T. Murao and M. Fujita, Visual Motion Observer-based Pose Control with Panoramic Camera via Passivity Approach, 2010 American Control Conference, 2010年6月9日, ボルチモア, アメリカ
- ③ T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Visual Motion Observer-based Stabilizing Receding Horizon Control via Image Space Navigation Function, 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2010年9月9日, 神奈川県, パシフィコ横浜
- ④ T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Passivity-based Synchronized Visual Feedback Control for Eye-to-Hand Systems, 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2009年11月3日, ポルト, ポルトガル
- ⑤ Y. Ishikawa, H. Kawai and N. Kobayashi, An Experimental Study of Visual Feedback Control on 2DOF Parallel Link Manipulator, 3rd Japan-China-Korea Joint Workshop on Robotics, 2008年9月30日, 富山県, 富山国際会議場
- ⑥ H. Kawai, T. Murao and M. Fujita, Passivity-based Dynamic Visual Force Feedback Control for Fixed Camera Systems, 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2008年9月3日, サンアントニオ, アメリカ
- ⑦ T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Predictive Visual Feedback Control with Eye-in/to-Hand Configuration via

Stabilizing Receding Horizon Approach, 17th IFAC World Congress on Automatic Control, 2008年7月8日, ソウル, 韓国

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河合 宏之 (KAWAI HIROYUKI)
金沢工業大学・工学部・准教授
研究者番号 : 70410298

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :