

ショートペーパー (基礎)

MicroSpidar

-力覚提示装置を用いた微小作業支援環境の基礎的検討-

古川 正紘^{*1} 太田 光紀^{*1} 宮島 悟^{*1} 杉本 麻樹^{*1} 長谷川 晶一^{*1} 稲見 昌彦^{*1}

Masahiro Furukawa,^{*1} Mitsunori Ohta,^{*1} Satoru Miyajima,^{*1}

Maki Sugimoto,^{*1} Syoichi Hasegawa^{*1} and Masahiko Inami^{*1}

Abstract – We develop SmartTools as a part of the study of augmented reality. In this paper, we will introduce Micro Spidar. This design goal is Micro Spidar enables us to support micro operations within millimeter order. And we report about a trial implementation enables the modality transformation of optical leads into haptic sensations.

Keywords : Augmented Reality, Haptic Display, Micro Operation, Spidar, Real Time Sensor

1. はじめに

Augmented Reality (以下, AR) の研究は, 古くから作業支援に応用されてきた. 特に作業者の視覚に対して働きかける手法については盛んに議論が交わされている [1]. しかし, 作業者に提示した情報が実際の作業に反映されるまでに, 解釈し判断を必要とするため遅延が避けられないなどの問題から, 力覚的な手法に注目が集まっている. そこで筆者らは, 力覚の AR による直接的な作業装置 SmartTool を提案してきた [2].

SmartTool とは道具にセンサを搭載し, センサから得られた情報を積極的に力覚情報に変換して作業者に提示することを目的とした, 知能化された道具の総称である. 基本的に環境計測のためのセンサ, 作業に用いる道具, 力覚提示部の 3 つの構成要素から成り立っている. この概念の最大の利点は, 道具先端のセンサと力覚提示の融合により, 人間が今まで不可能であった作業を可触化の補助を受けて実現することにある.

さらにこの道具先端部のセンサを用いることで, 生体などの時々刻々と移動するような対象物を相手にしても, 適切に刃先侵入量などを計測可能である. このことから対象物の絶対位置を計測する必要がなくなり, 対象物と道具との相対関係のみ議論すればよいという SmartTool を特徴付ける利点を持つ.

しかし筆者らの提案してきた SmartTool はセンチメートルオーダの作業領域を対象としていた. そこで本稿では, ミリメートルオーダの作業領域を対象とした微小作業を支援する装置 MicroSpidar を開発し, 作業支援の位置精度について議論したので報告する.

2. 微小領域の作業支援

微小領域の作業支援としてまず考えられるのがスケール変換である. Intuitive Surgical 社製の da Vinci がこれを採用している [3]. この装置は遠隔手術のためのインタフェースをもち, 施術者側 (マスタ) の動きを縮小しマニピュレータ (スレーブ) の動きに変換する. これは精密な作業を実現可能である一方で, スケールの異なる作業技能を新たに訓練する必要が生じる. また微小操作が可能な力覚装置としては [4] が挙げられるが, これは VR 空間内に対する入力装置であり本研究とは目的が異なるといえる. この点で AR 技術は, 必要な装置を力覚提示部だけに簡略化可能な利点を持つ. そこで, 本稿では本来道具から伝わる力覚情報は活かした上で力覚を重ね合わせる手法に焦点を当てる.

3. MicroSpidar

3.1 力覚提示装置

今回提案する MicroSpidar は, ミリメートルオーダの作業領域を対象とした作業支援を目的としている. そのためにエンドエフェクタの位置計測には十分な計測精度が要求され, 力覚提示のために高剛性, 低慣性, 低バックラッシュが同様に要求される. この要求に応える機構として, パラレルリンクまたは SPIDAR 機構が挙げられる. パラレルリンク機構はリンクに剛性が必要となるためリンク重量が増し, 結果的に慣性モーメントが増加する. 一方で SPIDAR 機構はエンドエフェクタとアクチュエータ間を軽量のワイヤで結合しており, 低慣性のまま力覚提示を実現している. さらに視界を妨げない利点も有しているため, MicroSpidar には図 1, 図 2 に示すような 3 自由度のパラレル機構を採用した. アクチュエータには, Maxon RE25(118746, 定格

*1: 電気通信大学

*1: The University of Electro-Communications

出力 10.0W) を 3 個用いた。このモータは摩擦、慣性 (10.5[gcm²]), 粘性が小さく停動トルクが 144[mNm] と大きいなどの利点がある。

バックラッシュなどの減速器の持つヒステリシスは精度を低下させる要因となるため、ダイレクトドライブ方式を採用した。低慣性化を狙ったアクリル製のポールバーをモータシャフトに直結し、TORAY 社製の PE ライン 3.0 号を介して 3 点支持でエンドエフェクタを固定した。エンドエフェクタも小型かつ軽量である必要があり、図 3 に示す形状とした。

計測系の高い分解能と応答性を確保するために、フォトトリフレクタを用いポールバーの角度計測を行った。アクチュエータに直結したポールバーの回転角度を、SANYO 社製超小型フォトトリフレクタ SPI-315-34 (図 1 の PhotoReflector) の出力電圧を反転増幅し、Spidar Amp [6] に入力した。またポールバーの角度検出レンジを広げるために、再帰性反射材 (図 1 の Retro reflector) を貼付し反射光量を確保した。繰り返し位置決め精度 ± 0.5[μm] 以内の Kohzu 社製 XY ステージ YA05-R1

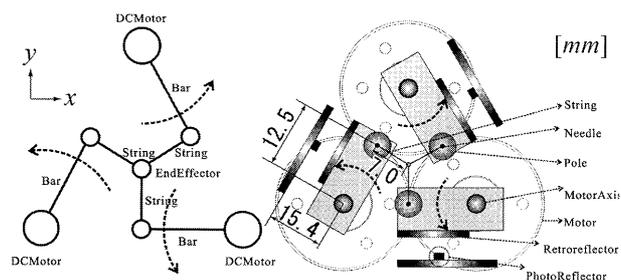


図 1 駆動機構 (模式図)

Fig. 1 Actuator Configuration (Illustration)

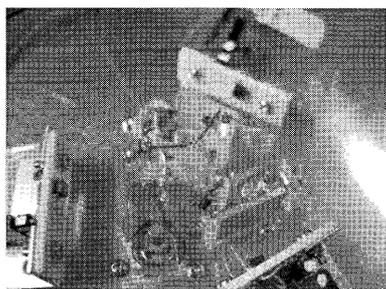


図 2 駆動機構 (写真)

Fig. 2 Actuator Configuration (Picture)

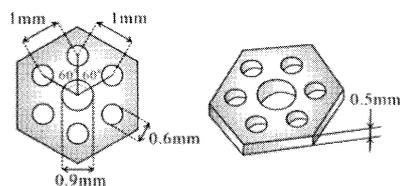


図 3 エンドエフェクタ

Fig. 3 End-Effector

および同社製モータドライバ MD-255D を用いた真値を入力し計測誤差を評価した結果、エンドエフェクタの位置を最大誤差が 0.05[mm] 以内で計測可能であることが確認できた。従ってミリメートルオーダの作業領域のための位置計測系としては、十分な計測精度を持つことが確認された。

3.2 力覚情報の導出

位置精度の高い作業支援を行うためには、力覚提示系のインピーダンスを高める必要がある。すなわち制御周波数を高く保つ必要が生じることから、高速な I/O 特性を持つ SPIDAR Amp を採用した。また力覚提示装置の制御には、SPIDAR Amp のサポートが可能なライブラリ Springhead [7] を利用した。

フォトトリフレクタの出力電圧からバーの角度が求まり、糸の長さが既知であることからエンドエフェクタに固定された道具の位置が求まる。提示力はこの道具の侵入量に応じた反力として提示し、算出にはバネダンパモデルを用いた。この反力は図 1 の y 軸方向について考えたとき、反力 F 、バネ定数 k 、粘性係数 B 、目標位置 y_d 、エンドエフェクタ位置 y 、速度 v を用いて式 (1) のように表される。

$$F = -(k(y - y_d) + Bv) \quad (1)$$

速度 v は算出したエンドエフェクタの位置から後退差分である。ノイズの高周波成分の影響を抑えるため、過去 50 件の速度データを平滑化した。MicroSpidar のバネ定数は 10[N/mm] とした。この値は SensAble 社 PHANToM Premium 3.5[N/mm] と比較し高い値であり、位置精度の高い作業支援には妥当であると考えられる。また更新周波数が 1[kHz] 以上であることが確認できたため、収束条件 [5] より粘性係数 0.005[Ns/mm] を設計した。これにより、高いバネ定数を実現しながらも発振のない力覚提示を実現した。

2次元平面内の任意の力を 3つのモータのトルクに変換するアルゴリズムとしては、長谷川らの「張力型力覚提示装置のための張力計算法」[8] を用いた。但し本稿では、モータに装着されたアームと同一の 2次元平面内で力覚提示方向を図 1 の y 軸 1 方向に限定した精度評価を行っている。

3.3 道具先端部のセンサ

SmartTool の概念を特徴付ける道具先端部のセンサを用いることで、作業対象物と道具の相対関係を取得することができる。道具先端部のセンサは、小型化、軽量化、高速応答が望ましいことから、図 4 に示した光学式センサを採用した。このセンサは 3 点の発光部と中央 1 点の受光部からなり、反射光強度をフォトトランジスタで測定することで対象物表面を計測する。

古川・太田・宮島・杉本・長谷川・稲見 : MicroSpidar-力覚提示装置を用いた微小作業支援環境の基礎的検討-

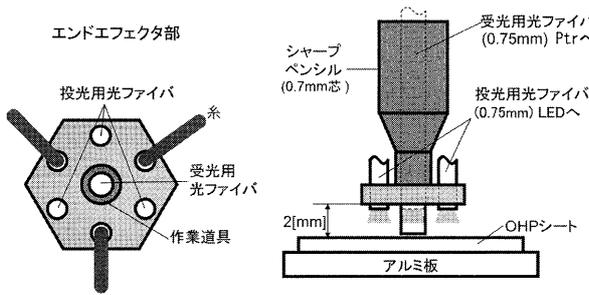


図4 道具先端の光センサ
Fig. 4 Optical Sensor on Tool-Tip

このとき式(1)のバネ-ダンパモデルの侵入量は、フォトトランジスタからの出力に基づく電圧 $Ptr_V[V]$ とスレシヨルド電圧 $Threshold_V[V]$ との差を用い、式(2)に置き換えられる。

$$F = -((Ptr_V - Threshold_V) + Bv) \quad (2)$$

フォトトランジスタは720[nm]のピーク感度波長を持つ東芝セミコンダクタ社製TPS603Aを用い、投光部には赤色高輝度LEDを用いた。光ファイバは、三菱レイヨン社製エスカ直径0.75[mm]を用いた。

まずOHPシートに黒いパターンを印刷しMicroSpidar作業面に貼り付け、光ファイバ先端とMicroSpidar作業面との距離を変化させた際のTPS603Aの出力電流を、蛍光灯照明下で測定した。その結果、ファイバ先端を測定面に接触させた場合、ファイバの僅かな傾きが計測値に大きく影響し、計測が不可能であった。一方でMicroSpidar作業面とエンドエフェクタ間の距離である2[mm]条件下では、黒いパターン上で50[μA]、パターン外で300[μA]を示し、パターンを十分に識別できた。そこでこの距離を光ファイバとMicroSpidar作業面間として採用した。またこの出力電流を200[kΩ]の半固定抵抗を介し電圧変換し、3V付近までOPアンプLM324にて40倍の非反転増幅を行い Ptr_V とした。

4. 評価実験

実験では、作業の位置精度向上に力覚提示そのものが寄与したか(実験1)、道具先端部のセンサの可触化効果が寄与したか(実験2)、をそれぞれ評価した。そこで、侵入禁止領域の境界線を模したパターンを印刷し、これを目視により道具先端でなぞった。このとき実験者は、エンドエフェクタに固定された道具であるシャープペンシルを垂直に把持した。パターンはOHPシートに印刷され、作業領域中央を原点に定めたときに $y=0.5[mm]$ を端面にもつ幅1[mm]のものである。このパターンと道具先端の描く軌跡との位置誤差を比較し、評価した。

まず実験1として、道具先端の光センサを用いず

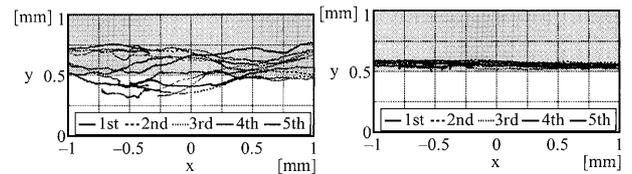


図5 目視のみ
Fig. 5 With Only Eye

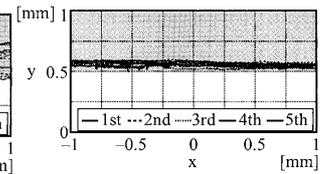


図6 壁の力覚提示あり
Fig. 6 With Virtual Wall

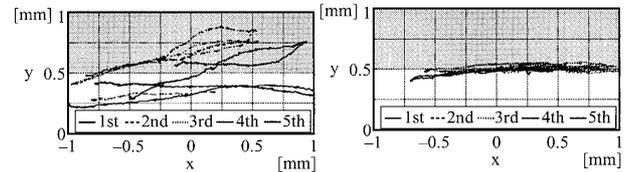


図7 光センサ力覚提示なし
Fig. 7 With Only Eye

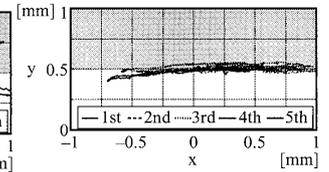


図8 光センサで可触化
Fig. 8 With Optical Sensor

にバーチャルな定規を力覚として重畳した際の効果を評価した。定規はパターンの端面と一致した y 軸0.5[mm]に置き、力覚として提示した。そして目視でパターンをなぞり、パターン位置に対する道具先端が描いた軌跡との誤差を力覚提示あり、なしの場合で比較した。その結果の道具軌跡をそれぞれ、図5、図6に示す。目標軌跡とした印刷パターンは、図中に網掛けで示した。

位置誤差は、力覚提示なしの場合は最大0.3[mm]と軌跡は大きな揺らぎを示している。一方で、力覚提示ありの場合は最大0.1[mm]であった。この誤差は定常偏差を示しており、バネ-ダンパモデルの侵入量として力覚算出に必要な量であると考えられる。従って、要求精度に応じて予めオフセット量を定義することで定常偏差を削減可能であるといえる。この定常偏差を除いた際の最大偏差は0.05[mm]と、MicroSpidarの測定誤差を示しており、計測系の性能に由来する誤差であると思われる。従って実験1より、バーチャルな定規を力覚提示することにより、0.05[mm]の位置決め精度で作業支援が可能であることが分かった。

次に実験2として、道具先端に搭載した光センサを用いた可触化効果を評価した。この実験では道具先端の光センサでパターンの境界線を読み取り、パターン位置にあたかも硬い壁があるかのような力覚提示を行った。先ほどの実験と同様に、目視でパターンをなぞるタスク実験を力覚提示なし、ありの条件で行った結果を行った。その際の道具軌跡をそれぞれ、図7、図8に示す。

軌跡の誤差を比較すると、力覚提示なし場合が最大0.4[mm]、力覚ありの場合が最大0.05[mm]以内であった。この実験2の力覚提示なし条件は実験1と等価条件であるため、最大誤差も類似の結果を得るはずである。しかし、実験1の力覚提示なし条件と比較したとき最大誤差は増加している。これは、手がかりが目視

に限られるためのばらつきによるものと考えられる。一方で、実験1に対して実験の2力覚提示あり条件では定常偏差が減少している。これはバネ-ダンパモデルの侵入量が光センサの出力値に依存することから、道具先端の光センサの増幅ゲイン調整による効果であるといえる。このとき $Threshold_V$ は 1.5[V] であった。従って実験2より、開発した MicroSpidar は道具先端の光センサを用いた可触化を行うことで、0.1[mm] の位置決め精度で作業支援を実現できたといえる。

実験1, 2より、力覚提示方向を1方向に限定した条件下では、MicroSpidar は 0.1[mm] の位置決め精度で可触化による作業支援を実現できたことが分かった。

5. まとめ

本研究では、ミリメートルオーダの作業領域を支援可能な SmartTool として、MicroSpidar を開発した。本稿では MicroSpidar のもつ作業支援能力を評価するために、道具先端の光センサからの情報に基づく可触化装置を実装し、位置精度の評価を行った。その結果、0.1[mm] の位置決め精度で作業支援が可能であることが示された。ミリメートルオーダの作業領域をもつ SmartTool としては、目標とする精度を保つことができたといえる。

今後の課題は力覚提示方向を多軸方向に拡張した条件下での評価実験、また作業対象物が動的な場合での評価実験など、MicroSpidar の持つ微小作業支援能力について評価を進めていきたい。

(2007年10月22日受付)

参考文献

- [1] Ronald T. Azuma: "A Survey of Augmented Reality", Presence, Vol.6, No.4, pp355-385, (1997)
- [2] 野嶋琢也, 関口大陸, 稲見昌彦, 館暲: "力覚提示を利用した実時間環境作業支援システムの提案", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.2, pp193-199, (2002)
- [3] Wassilios Bantas, Marc Wolfram, et al: "Da Vinci robot assisted Anderson-Hynes dismembered pyeloplasty: technique and 1 year follow-up", World Journal of Urology, Vol.21, No.3, pp133-138(2003)
- [4] Pietro Buttolo, Blake Hannaford: "Pen-Based Force Display for Precision Manipulation in Virtual Environments", Proceedings of Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'95), (1995)
- [5] Margaret Minsky, Ming Ouh-young, et al: "Feeling and Seeing: Issues in Force Display", (1990)
- [6] 赤羽克仁, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠: "10kHzの更新周波数を実現する高解像度ハプティックコントローラの開発" 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.9, No.3, (2004)
- [7] Shoichi Hasegawa, Naoki Okada, Jiro Baba, Yuichi Tazaki, Hiroshi Ichikawa, Akihiko Shirai, Yasuharu Koike, and Makoto Sato: "Springhead:

Open source haptic software for virtual worlds with dynamics simulations", Proceedings of EuroHaptics (2004)

- [8] 長谷川晶一, 井上雅晴, 金時学, 佐藤誠: "張力型力覚提示装置のための張力計算法", 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6, pp1-6, (2004)

[著者紹介]

古川 正紘 (学生会員)



2005年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。2007年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻修了。現在、同研究科博士後期課程同専攻に在籍。ヒューマンインタフェースに関する研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会会員。

太田 光紀 (正会員)



2005年茨城工業高等専門学校専攻科機械・電子制御工学専攻修了。2007年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻修了。同年、日産自動車株式会社に入社し、現在に至る。日本バーチャルリアリティ学会学生会員、社団法人自動車技術会正会員。

宮島 悟



2004年東京都立大学工学部精密機械工学科卒業。2006年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻修了。

杉本 麻樹 (正会員)



2006年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻修了。博士(工学)。現在、電気通信大学電気通信学部知能機械工学科特任助教。画像提示装置を用いた計測と制御の研究に従事。

長谷川 晶一 (正会員)



1997年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。1999年同大学大学院知能システム科学専攻修了。同年ソニー株式会社入社。2000年東京工業大学精密工学研究所助手。2007年電気通信大学知能機械科助教授。同年准教授、現在に至る。バーチャルクリーチャー、物理ベースモデリング、力触覚、エンタテインメント工学の研究に従事。

稲見 昌彦 (正会員)



1999年東京大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。東京大学リサーチ・アソシエイト、同大学助手、電気通信大学講師、同大学助教授、JST さきがけ研究者、MIT コンピュータ科学・人工知能研究所客員科学者を経て、現在、電気通信大学知能機械工学科教授。日本バーチャルリアリティ学会、ACM、IEEE Computer Society 等各会員。