

張力型力覚提示装置のための張力計算法

長谷川 晶 一* 井上 雅 晴* 金 時 学* 佐藤 誠*

Tension calculation method for tension driven force display

Shoichi HASEGAWA*, Masaharu INOUE*, Seahak KIM* and Makoto Sato*

In this paper, we propose a novel tension calculation algorithm for tension-based force displays. The algorithm uses quadratic programming method to find optimal tension force and achieves stable force displays.

We made some experiments to evaluate proposing method with a tension-based force display, SPIDAR. Results show that proposed method eliminates vibration and enlarges operating area.

Key Words: Wire Drive System, Tension Calculation, Force Display, Haptic Display, Quadratic Programming

1. はじめに

ユーザの手や指の位置情報を入力するとともに、ユーザに力を提示することで情報を提示する力覚提示装置が開発されている。これらは、さまざまな機構を用いて力覚を提示している。例えば、BrooksらのGROPE [1] や Sensable社のPHAN-ToM [2] は、シリアルリンク機構を採用している。また、岩田らのHaptic Master [3] や、Force DimensionのThe Delta Haptic Device [4] のようにパラレルリンクを利用した、高剛性で軽量な力覚提示装置も開発されている。それらの中でも、佐藤らのSPIDAR [5]、森園らのパラレルワイヤ駆動システム [6] のようなワイヤや糸の張力によって力覚情報を提示する機構は、

- パラレル駆動なので、高剛性で軽量な力覚提示装置を構築できる。
- 機構が非常に軽量なので、提示可能な機械的インピーダンスの範囲が広い。
- 装置の透明性が高く作業領域での映像提示を妨げない。
- ワイヤや糸の長さを大きくとることで、可動範囲を容易に広げることができる。

等の利点がある。

しかし、張力を用いた力覚提示装置では、張力はワイヤや糸の向きにのみ働き、提示力は張力の合力となるため、提示可能な力が限られるという問題がある。さらに、ワイヤや糸の向きは提示部（グリップ、指キャップなどのユーザが触れる部分）の位置によって大きく変化するため、提示部の位置によって提示

可能な力も大きく変化する。このため、任意の向きに十分な力が提示できる領域は提示部の可動域の一部となる。

力覚提示装置は、任意の向きに十分な力が提示できない場合でも、目標の力に近い力を提示することで物体形状の提示や物体操作の補助をすることができるので、ユーザインタフェースとして使用することができる。このときに力覚の正確さのみを考慮して、目標の力にできるだけ近い力を提示するように張力を制御すると、張力が急激に変化する場所ができてしまう。張力が急激に変化すると位置計測の誤差などのため、提示力にも大きな誤差が含まれてしまう。また、位置に対して張力が急激に変化すると発振しやすくなり、安定した操作を行うことができなくなる。

そこで本研究では、提示力の正確さだけでなく張力変化の連続性を考慮に入れた新しい張力計算法を提案する。提案方法は張力計算を二次計画問題に帰着させている。二次計画問題は二次形式の最適化問題であり、効率の良い求解アルゴリズムが存在し実用性が高い。

また張力を使用した力覚提示装置であるSPIDARを使用して評価実験を行い、提案した方法の有効性を検証した。

2. 力覚提示が可能な領域

2.1 張力型力覚提示装置

張力型力覚提示装置は、提示部を複数のワイヤを介してモータで引くことによって力覚提示を行う。モータの配置、提示部の機構とワイヤの取り付け位置の設定によって、さまざまな力覚提示装置を作ることができる。

2.2 完全提示域と部分提示域

張力型力覚提示装置では、張力がワイヤの向き（提示部からワイヤの繰り出し口に向かう向き）にしか働かない。このため、提

原稿受付

*東京工業大学 精密工学研究所

*Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

示部の位置によっては一部の向きに力を生成することができない．任意の向きに力を提示するためには，ワイヤの向きが Force-Closure [7] の条件を満たさなければならないことが知られている [8]．Force-Closure の条件とは，

- (1) m 本のワイヤのうちどの n 本をとってもそのワイヤの方向ベクトルが線形独立
- (2) ワイヤの方向ベクトルを w_i として，

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i w_i = 0 \quad (\alpha_i > 0). \quad (1)$$

を満たす α_i が存在すること．

である．しかし，この条件を満たさない場合でも方向によっては力提示が可能なので，力覚提示装置として使用できる [9]．

本論文では，任意の向きに力が提示可能な領域を「完全提示域」と呼び，その外側の部分的な力提示しかできない領域を「部分提示域」と呼ぶ．つまり，提示部が完全提示域にあれば任意の向きに力が提示できる．

Fig.1 に，2次元平面内の力を3本のワイヤで提示する力覚提示装置について，完全提示域と部分提示域を図示する．

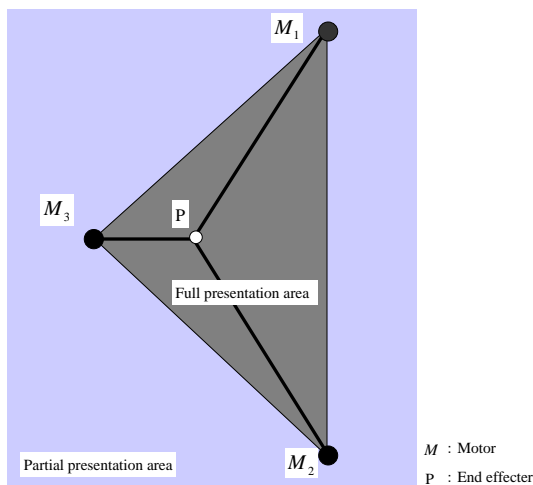


Fig. 1 Full presentation area and partial presentation area of haptic interface with three wires

2.3 従来の張力計算方法

従来の張力計算方法には，

- (1) 使用する糸を選択し冗長性を排除した後，目標の力を提示するために必要な張力を求めるもの [10]．
- (2) 擬似逆行列の解の中から，非負の解を探し出すもの [11]．
- (3) 各ワイヤの張力を力センサで計測して提示力を求め，目標提示力との計測提示力の差が小さくなるよう提示部の位置を制御するもの [6]．

がある．部分提示域では，(1)，(2) は張力が求まらず，(3) では提示部を目標位置に移動することができない．

また，完全提示域を使用しない力覚提示装置 [9] [12] では，まず目標提示力を提示可能な力に変更し，そのあと，(1) の方法で提示力を求めている．しかしこの方法は目標提示力の変更方法が機構に依存しており汎用性に欠ける．

2.4 領域境界での張力の不連続性

張力型力覚提示装置は完全提示域内では任意の向きに力を提示できるが，力提示に必要な張力は，提示部の位置によって大きく変化する．特に，ワイヤの向きと提示力の向きが大きく異なる場合，提示力に対して大きな張力が必要となる．

例として，2次元平面内の力を3本のワイヤで提示する力覚提示装置を考える．Fig.2 は目標提示力 f にできるだけ近い力を提示したときの張力を示している．モータを各頂点とする三角形内が完全提示域となる．

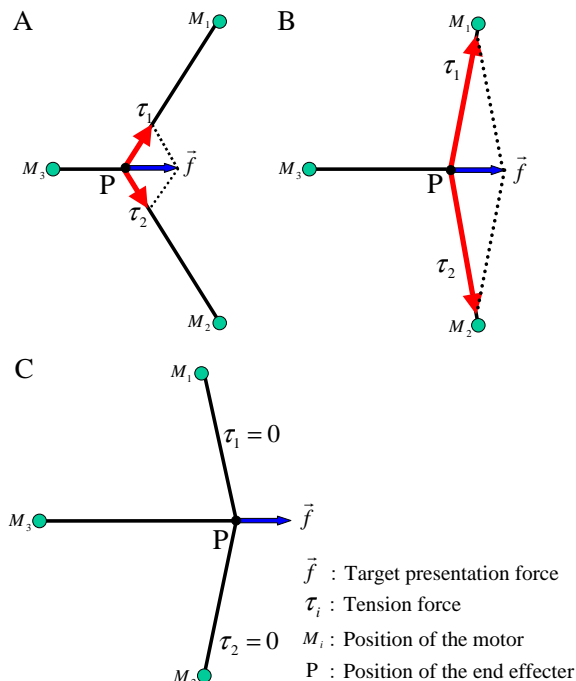


Fig. 2 The end effector's position and the changes of tensions

提示部が完全提示域の中央に位置する場合 (Fig.2-A)，力提示に寄与する2本のワイヤの方向ベクトルと提示力の向きが近いので，比較的小さな張力で目的の力を提示できる．提示部が完全提示域の周辺部に位置する場合 (Fig.2-B)，力提示に寄与する2本のワイヤの方向ベクトルと提示力の向きが離れているため，目的の力を提示するために大きな張力が必要となる．提示部が部分提示域に位置する場合 (Fig.2-C)，提示力向き成分を含む方向ベクトルのワイヤが存在しないため，力を提示することができない．このときは，ワイヤ張力を0にして不要な力を提示しないようにする．

力覚提示装置が一定の力 f を提示し，ユーザーが提示部を中心から外側に向かって動かした場合，力覚提示装置は，Fig.2-A の状態から Fig.2-B の状態を経て Fig.2-C の状態に変化する．このとき張力は，Fig.2-B の状態で非常に大きくなり，その後，Fig.2-C の状態で0となる．

このように一定の力にできるだけ近い力を提示しつつ，提示部を境界面を跨いで動かすと，完全提示域の境界面で張力の大きさが急激に変化することがある．この現象は多自由度デバイスでも同様に生じる．

3. 安定性を考慮に入れた力覚提示法の提案

3.1 提示力制御に求められること

提示すべき力と実際に提示した力の差が小さければ、提示した力覚が正確であるといえる。しかし安定な操作を実現するためには、正確性だけでなく次のことも考慮する必要がある。

連続性

2.4 節に示したように、一定の力の提示に必要な張力は完全提示域の境界付近で急激に変化する。一定の力を提示している場合でも、張力が急激に変化するとワイヤ長などが変化し、位置計測や提示力に影響を与える。提示力や位置計測への影響によって、提示力が位置に対して大きく変化すると、振動などの問題を生じることがある。このため、安定な力覚を提示するためには、張力の急変をさげ、張力が連続に変化するように制御する必要がある。

効率性

張力型力覚提示装置ではモータによる慣性や摩擦を低く抑えるため、できるだけ小さなモータが用いられる。このようなモータは大きなトルクを出力し続けると発熱し、温度が限界を超えて高くなると焼損してしまう。モータの温度を低く保つためには、できるだけ小さなトルクで効率よく力覚提示を行う必要がある。

3.2 2次計画法を用いた張力計算法

力覚提示装置の制御に求められる性質として、「正確性」、「連続性」、「効率性」を挙げた。これらの性質を満足するような張力計算法を考える。算出すべき各ワイヤの張力を τ_i 、提示部から各モータへのワイヤの向きを表す単位ベクトルを ϕ_i としたとき、提示される力は

$$\sum_i \tau_i \phi_i \quad (2)$$

となる。

張力には次の制約が与えられる。各モータが出すことのできる最大張力を τ_{max} 、ワイヤが弛まないように常にモータが出力する最小張力を τ_{min} とする。

$$\tau_{min_i} \leq \tau_i \leq \tau_{max_i} \quad (3)$$

ここではまず正確性だけを考慮し、提示したい力 f にもっとも近い力を提示する張力 τ_i を考える。そのような τ_i は、

$$\text{目的関数: } J_e = \| f - \sum_i \tau_i \phi_i \|_{Q_F} \quad (4)$$

を、式 (3) の制約下で最小にするので、張力を求める問題は目的関数 J_e を最小化する問題に帰着する。ここで、 $\| x \|_Q$ は、 x のノルム $x^T Q x$ を意味する。

しかし、このような τ_i は、解の一意性が保証されていない上、糸の方向ベクトル ϕ_i 、提示力 f に対して安定でなく、解の連続性に問題がある。そこで、目的関数 J_e を正規化し、解の一意性、連続性を保証する。 λ を正則化パラメータとして J_e を正則化すると、

$$\text{目的関数: } J = \| f - \sum_i \tau_i \phi_i \|_{Q_F} + \lambda \| \tau \|_{Q_T} \quad (5)$$

を得る。ここで、 τ は、ワイヤの張力ベクトル (τ_1, \dots, τ_n) である。

$Q_T > 0$ なので、 $\lambda > 0$ とすると J は正定値となり、解 τ の一意性が保証される。また、正則化パラメータ λ が大きいほど、解 τ は安定になる [13] [14] (付録 A 節参照)。このように、第 2 項とその重み λ は連続性に対応する。さらに、第 2 項は各張力の 2 乗の和なので、なるべく小さい張力を用いることになり、効率性も満足する。

以上により、3.1 節の要求を満たす張力を求める問題は、 τ_i に関する幾つかの制約条件 (式 (3)) の下で二次式の目的関数 (式 (5)) を最小化する問題に帰着された。このような問題は、二次計画問題と呼ばれ、さまざまな効率の良い解法が提案されている。この二次計画法により目的関数が最小となるとき τ_i を算出し、各ワイヤの張力とする。この張力計算法は各種・各自由度の張力型力覚提示装置に適用できる。

4. 力覚提示装置 SPIDAR による評価実験

前章で提案した新しい張力計算法の評価実験を行った。糸張力を用いた力覚手提示装置である SPIDAR [5] に提案手法を導入し、力覚提示の安定性の向上を調べた。二次計画問題の解法としては、次元が小さいときにも効率の良い有効制約法 [15] を用いた。

4.1 力覚提示装置 SPIDAR

SPIDAR (Fig.3) は、立方体型の枠を組み、4 頂点にモータ、プーリ、エンコーダを配置している。各プーリから糸を出し、4 頂点から出た糸を一点で結び、指先の位置とする。エンコーダが各糸の長さを回転角として取得し、4 本の糸の長さからユーザの指先の位置を算出する。指先の位置情報を使用して各モータが糸にかかる力を計算し、糸に張力を発生させることによってユーザに力覚情報をフィードバックする。力覚情報の更新周期は 1kHz である。今回は 3 自由度の SPIDAR を用い、目的関数を以下のように設定した。各変数の意味は 3.2 節と同様である。

$$\text{目的関数: } J = \| f - \sum_{i=1}^4 \tau_i \phi_i \|^2 + \lambda \sum_{i=1}^4 \tau_i^2 \quad (6)$$

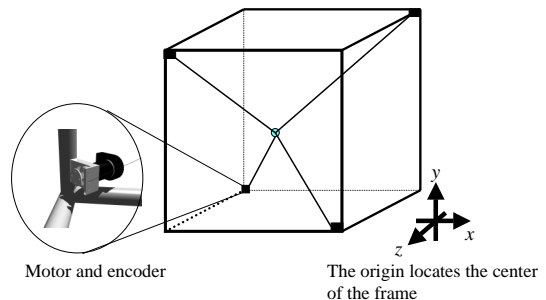


Fig. 3 SPIDAR

4.2 提示部の位置と張力の関係

正確性に対する連続性、効率性の比重を決める定数 λ の効果を示すため、一定の力を目標提示力としたときの提示部の位置

と張力の関係をさまざまな λ に対して計算した。

Fig.4 のグラフは、一定の力 $f = (5, 5, 5)(N)$ を目標の提示力とし、提示部をフレームの左下奥の点 $(-0.27, -0.27, -0.27)[m]$ と右上手前の点 $(0.27, 0.27, 0.27)[m]$ を結ぶ直線上に配置した際 (Fig.5 を参照) に算出される系の張力を表している。グラフには対称な 3 本の糸の張力を示した。

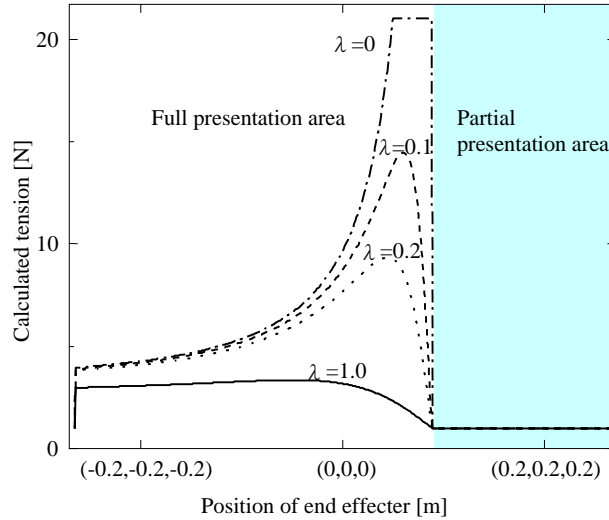


Fig. 4 The relation between the coefficient λ for continuity and the calculated tension τ

グラフから、 $\lambda = 0$ のときには、完全提示域と部分提示域の境界面で、提示張力が最大張力から最低張力へ急激に変化することが分かる。 λ が大きくなるにつれて提示張力の最大値が小さくなり、境界での張力の変化も小さくなる。

4.3 実験 1: 連続性の効果の検証

張力計算において、提示される力の「正確性」を重視した場合と「連続性」「効率性」を重視した場合を比較する実験を行った。4.2 節と同様に、Fig.5 のように一方向に一定の力を発生させ、力と同じ向きに提示部を動かしたときのそれぞれの出力値と指先位置の変化を調べた。 $f = (555)[N]$ の力覚提示を行い、指先を頂点から向かいの頂点へ力と同方向へ移動させた。このとき、実際の使用状態に近い状態となるよう、指や腕にはガイドを付けず、目視で軌道を確認しながら手先を移動した。

式 (6) で $\lambda = 0$ のときが提示力の「正確性」だけを条件とした場合に、 $\lambda \geq 0$ のときが「連続性」「効率性」を条件に加えた場合に相当する。 λ の値を大きくすると、より「連続性」「効率性」に比重を置くことになる。Fig.6 は λ の値を変化させたときの、提示部の x 座標と力の大きさの x 成分との関係を表すグラフである (対称性から y 方向、z 方向についても同様の結果が得られる)。

$\lambda = 0$ のときは完全提示域の境界面を提示部が通過する際に張力の急激な変化により振動が生じた。目標提示力は一定値 $((5, 5, 5)[N])$ だが、張力の急変が位置や提示力の急変を引き起こし、振動したと考えられる。

一方 $\lambda \geq 0$ のときは提示力は連続的に変化しており振動は生じなかった。 λ を大きくすると目的の力よりかなり小さい力し

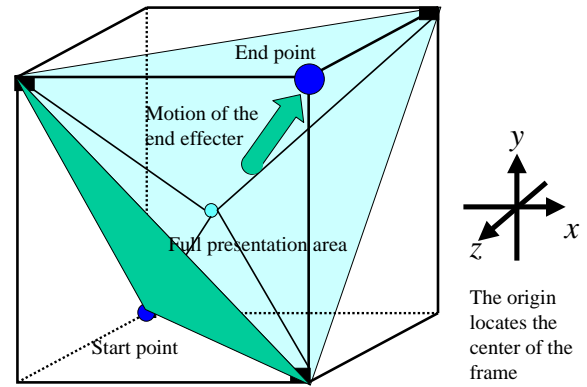


Fig. 5 Condition for experiment 1

か提示することができなかったが、提示力の大きさはより緩やかに変化し、操作が容易になった。

正確性だけを考慮した力覚提示法では、可動域内に指先に振動が生じる場合があった。そのため振動の生じない、安定な操作が可能な領域は完全提示域内に限定されてしまう。またある場所を通過することで急に振動が生じるような状況下では、ユーザの心理的負担も大きくなる可能性がある。新しい提示法を導入したことによりこのような問題点が解消されて可動域全体で自由に指を動かせるようになり、使用感が向上した。

また、目的関数の係数を変化させると提示される力覚情報の正確性、安定性、出力範囲が変化することが分かった。正確性、安定性、操作域のすべての要素を完全に満足させることはできないが、使用目的に応じて目的関数の各項の比重を調整することで、用途に適した力覚提示が可能となると考えられる。

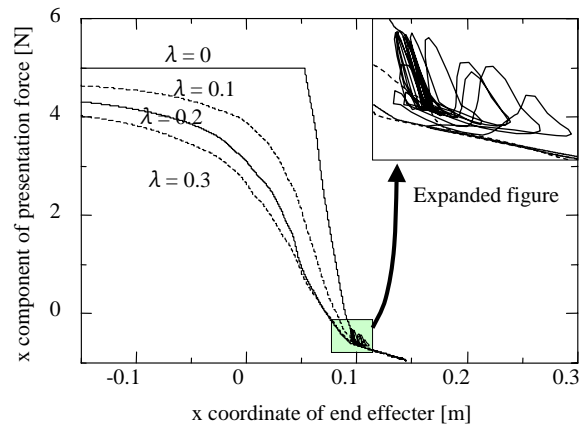


Fig. 6 The result of the experiment 1

4.4 実験 2: 仮想物体提示への効果の検証

単純な仮想物体を提示し物体をなぞった時の軌跡を比較することで、連続性を考慮したことの効果を検証する実験を行った。実験条件の概略を Fig.7 に示す。

提示する仮想物体は半径 $0.20[m]$ の円筒体とし、円筒体の中心軸は、外枠の立方体の中心を空間座標の原点としたときの y 軸と一致するようにした。この円筒体を $y = 0$ 平面内で一周なぞったときの指先の軌跡を計測した。実験に用いた SPIDAR の

フレームの一边は0.5[m]なので、円筒の断面は、 $y = 0$ 平面内で完全提示域と部分提示域に跨る。物体と指の間の摩擦はないものとし、ユーザの指先が円筒に侵入したときに、侵入距離に比例した反力を発生させるばねモデルを用いて、仮想物体を提示した。実験ではばね定数を2[kN/m]とし、指先があまり円筒に侵入しないようにした。

力覚提示方法は、目的関数を $\lambda = 0$ として「正確性」のみを条件とする場合 (A) と、 $\lambda = 0.2$ として「連続性」も考慮した場合 (B) を比較した。指先の軌跡を Fig.8 に示す。図内のひし形は完全提示域と部分提示域との境界面を表している。ひし形内が完全提示域である。

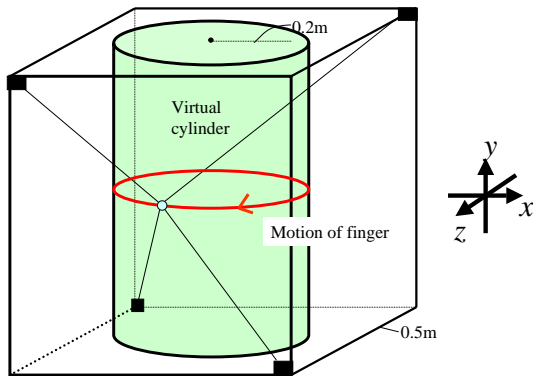


Fig. 7 Experiment 2: Presentation of a virtual cylinder

「正確性」のみを条件とした場合 (A) は、張力が不連続に変化するため振動が生じ、表面を滑らかになぞることができなかった。一方、「連続性」をも考慮した場合 (B) は、不要な力を感じることなく滑らかになぞることができた。「正確性」を多少犠牲にしても「連続性」を条件に加えたほうが、かえって精度の高い仮想物体を提示できるといえる。

5. おわりに

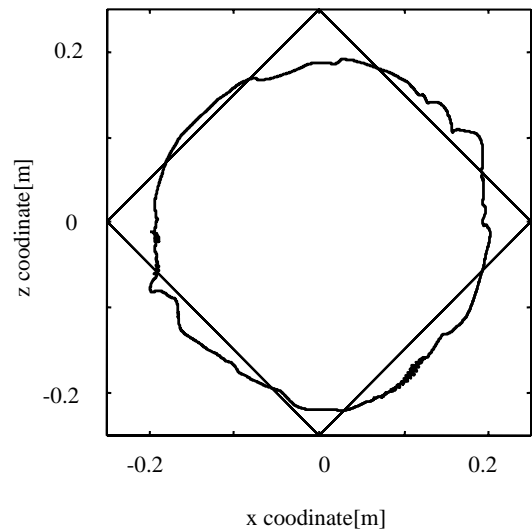
本論文では、安定性や効率性を考慮した、張力型力覚提示装置の張力計算方法を提案した。

安定な力覚提示を実現するためには、提示力の正確性だけでなく張力の連続性を考慮する必要があることを示し、張力計算を二次計画問題に帰着させた。提案手法を力覚提示装置のひとつである SPIDAR に導入し評価実験を行った。その結果、張力が連続的に変化することから振動等が解消し、可動域内で安定した操作が可能となったことが確認された。また実際に仮想物体を提示し、提案手法の有効性を確かめた。

参考文献

- [1] F.P. Brooks, M. Ouh-Young J.J. Batter, P.J. Kilpatrick: "Project GROPE - Haptic Displays for Scientific Visualisation", Proceedings of SIGGRAPH 90, 177-185.
- [2] SensAble Technologies: "The PHANToM Premium 1.0", <http://www.sensable.com/>
- [3] H. Iwata: "Artificial reality with force-feedback: Development of desktop virtual space with compact master manipulator", Proceedings of SIGGRAPH 90, pp.165-170
- [4] Force Dimension: "The Delta Haptic Device",

(A) considering correctness only ($\lambda = 0$)



(B) considering continuity ($\lambda = 0.2$)

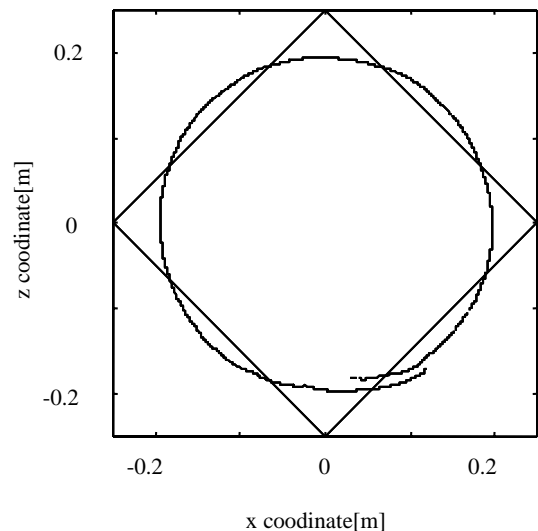


Fig. 8 The trajectory of the finger tip

<http://www.forcedimension.com/>

- [5] 佐藤誠, 平田幸弘, 河原田弘: "空間インタフェース装置 SPIDAR の提案", 電子情報通信学会論文誌 D- ,Vol.J74-D- ,No.7,pp.887-894(1991).
- [6] 森園, 井田, 和田, 呉, 川村: "パラレルワイヤ駆動システムによるパーティクルテニスを試み", 日本ロボット学会誌, vol.15 No.1,pp.153-161 (1997).
- [7] V.D.Nguyen: "Constructing Force-Closure Grasps in 3D", Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,pp.240-245,(1987).
- [8] 川村貞夫, 木野仁, 崔源, 勝田兼: "パラレルワイヤ駆動システムにおけるワイヤ座標系制御法", 日本ロボット学会学会誌, vol.16 No.4, pp.546-552 (1998)
- [9] M.Hirose, K.Hirota, T.Ogi, H.Yano, N.Kakehi, M.Saito and M.Nakashige: "HapticGEAR: The Development of a Wearable orce Display System for Immersive Projection Displays", IEEE VR2001,(2001)
- [10] M.Ishii and M.Sato: "A 3D Spatial Interface Device Using

- Tensed Strings”, Presence Vol.3, No.1, pp.81-86 (1994)
- [11] Seahak Kim, Shoichi Hasegawa, Yasuharu Koike, and Makoto Sato: ”Tension Based 7-DOF Force Feedback Device: SPIDAR-G”, Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2002, pp. 283-284 (2002)
- [12] S.WALAIRACHT, M.ISHII, Y.KOIKE, M.SATO: Two-Handed Multi-Fingers String-Based Haptic Interface Device”, IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, E84-D, [3] 365-373 (2001)
- [13] A.N.Tikonov: ”The stability of algorithms for the solution of degenerate systems of linear algebraic equations”, USSR Computational Math and Math Physics, vol.6 pp.181 (1965)
- [14] M.Sato, T.Iijima: ” σ -Inverse of a Matrix”, 電子情報通信学会論文誌 (E), vol.61 No.4 pp.280-285 (1978)
- [15] 矢部博, 八巻直一: ”非線形計画法”, 朝倉出版, pp.194-200 (1999)

付録 A. 正則化と張力の安定性について

系の張力 τ_i が式 (3) の制約を受けている場合, 張力は最大張力が最小張力のどちらかとなり安定である. そこで, 目的関数 J (式 (5)) に制約を受けている系の張力については, 張力を代入し, 制約を受けていない $n' (\leq n)$ 本の系の張力について考える. 添え字 i を振りなおし, 制約を受けない系の張力を τ_i , その系の方向ベクトルを ϕ_i とすると, の目的関数 J' は,

$$J' = \| \mathbf{f} - \sum_i \tau_i \phi_i \|_{Q_F} + \lambda \| \boldsymbol{\tau} \|_{Q_T} + c \quad (\text{A.1})$$

(c は制約式 (3) の代入による定数)

となる.

目的関数 J' の最小値は極小値と一致する. このとき張力 $\boldsymbol{\tau}$ は, $\Phi = (\phi_1 \dots \phi_n)$ として,

$$\frac{dJ'}{d\boldsymbol{\tau}} = 2(\Phi^T Q_F \Phi + \lambda Q_T) \boldsymbol{\tau} - 2\mathbf{f} Q_F \Phi = 0 \quad (\text{A.2})$$

を満たすため,

$$(Q_T^{-1} \Phi^T Q_F \Phi + \lambda) \boldsymbol{\tau} = Q_T^{-1} \mathbf{f} Q_F \Phi \quad (\text{A.3})$$

となる. 適切な正規直交行列 P を選ぶことで, 式 (A.3) は,

$$\boldsymbol{\tau} = P^{-1} \begin{pmatrix} \frac{1}{a_1 + \lambda} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \frac{1}{a_n + \lambda} \end{pmatrix} P Q_T^{-1} \mathbf{f} Q_F \Phi \quad (\text{A.4})$$

となる. ここで, a_1, \dots, a_n は, $Q_T^{-1} \Phi^T Q_F \Phi$ の固有値であり, 糸が平行に近くなり, Φ が縮退に近づく場合に, a_1, \dots, a_n の一部が 0 に近づく. λ を大きくすることで, $\frac{1}{a_i + \lambda}$ が大きな値をとることが防げ, $\boldsymbol{\tau}$ を安定化できる.

長谷川晶一 (Shoichi HASEGAWA)

1997 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業, 1999 年同大学院知能システム科学専攻修士終了. 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, 現在に至る. バーチャルリアリティ, 力覚インタフェース, ヒューマンインタフェースの研究に従事. (日本ロボット学会正会員)

井上 雅晴 (Masaharu INOUE)

2003 年東京工業大学大学院知能システム科学専攻修士課程修了, 同年日本ユニシス株式会社入社, 現在に至る. 力覚提示装置「SPIDAR」の制御方法に関する研究に従事.

金 時学 (Seahak KIM)

2001 年東京工業大学大学院知能システム科学専攻修了, 同年, Mimic Technologies Inc. 入社, 現在に至る. 6 自由度力覚提示装置「SPIDAR-G」に関する研究に従事.

佐藤 誠 (Makoto SATO)

1973 年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業, 1978 年同大学院博士課程修了, 同年, 同大学工学部助手, 現在, 同大学精密工学研究所教授, 現在に至る. パターン認識, 画像処理, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 工学博士.