

弾性物体の柔らかさの認知と提示に関する 実験的検討



1.固有覚・触覚・視覚の寄与率



2.つまみ動作の法則性



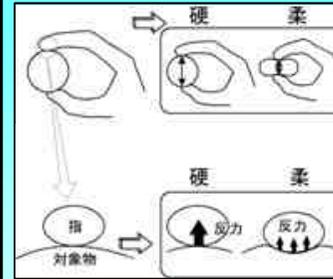
3.接触面積制御による
柔らかさ提示



4.受動的遠隔共有

東京農工大学 藤田欣也

柔らかさ(変形/力)の認知



指先変位=固有感覚で知覚
(筋紡錘, 関節受容器)

接触面積変化=触覚で知覚

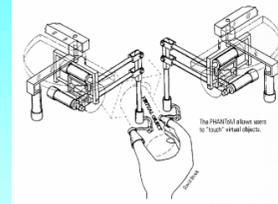
指先で力印加 変位 + 接触面積増加
(固有感覚) (触覚)

1.弾性物の柔らかさ知覚における 固有覚・触覚・視覚の寄与率



力覚提示装置による柔らかさ提示

Grounded Force Display
(基準座標系: 外部空間)



PHANTOMカタログより

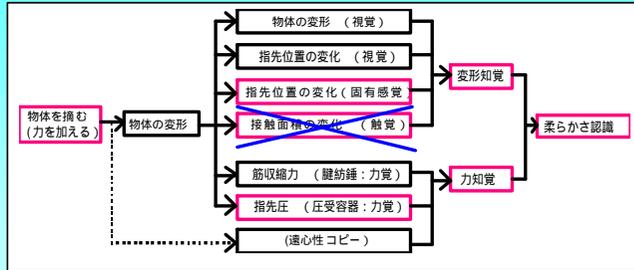
Ungrounded Force Display
(基準座標系: 上肢)



指先反力提示装置

「指先変位」と「指先反力」の関係を制御

力覚提示による柔らかさの認知

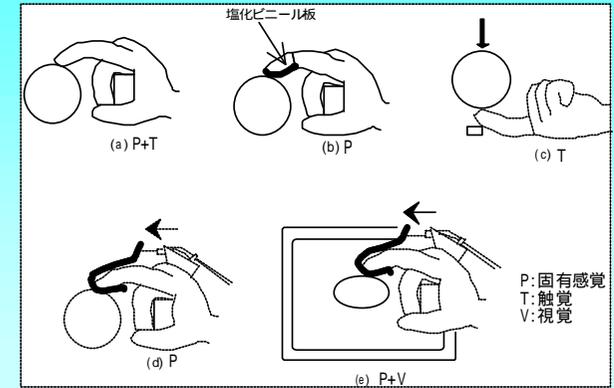


力覚提示装置につまみ力を加えると

物体の変形に応じて反力が提示され、そのときの指先位置が深部体性感覚で知覚される

力覚提示装置の場合、触覚による変形知覚がない

実験 1: 柔らかさ識別実験



(指先位置変化はゴニオメータで計測)

研究の動機

- 柔らかさの知覚には変位感覚 (固有感覚) + 圧分布感覚 (触覚) が関与



- 力覚提示装置のみでは不十分だが... 力覚 + 触覚提示は装置複雑化, 実装困難



- 力覚と触覚の機能的重要性の比率は? (力覚提示装置のみでも問題ないのか / 触覚提示装置が必要なのか)



実験条件

- 課題：一対比較の柔らかさ識別 (同一柔らかさ含む)
 - 2つの物体を順に提示 (一度だけ再試行可)
 - 回答は「同じ」を含む3者択一
- 柔らかさ:4段階
 - 0.015, 0.028, 0.042, 0.060 (Kgf/mm)
 - (ロードセルとマイクロメータによる実測値)
- 被験者:10人 (Q1~37歳)
- 試行数:10通り(全組合せ)×5回

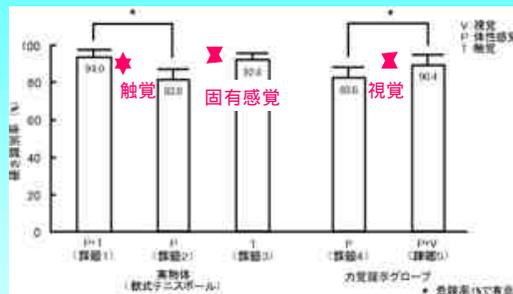
得られた知見と疑問

- 固有覚・視覚より触覚が寄与率大

触覚	>	視覚	>	固有感覚
11.2%		6.8%		1.4%

- 触覚と動作の関係は? 2へ
- 触覚制御で柔らかさを提示可能? 3へ

柔らかさ知覚における各感覚の寄与



触覚	>	視覚	>	固有感覚
11.2%		6.8%		1.4%

弾性物体の柔らかさの認知と提示に関する実験的検討



1. 固有覚・触覚・視覚の寄与率

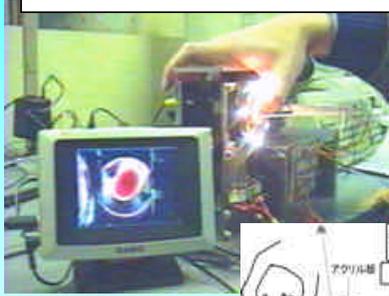
2. つまみ動作の法則性



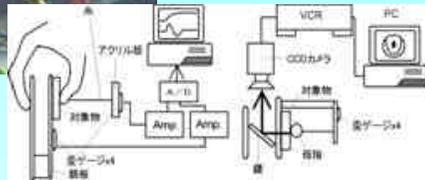
3. 接触面積制御による柔らかさ提示

4. 受動的遠隔共有

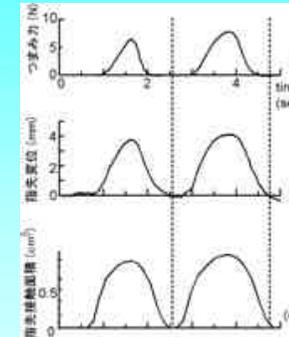
2. つまみ動作の法則性



- つまみ中の
 - つまみ力
 - 指先変位 を解析
 - 接触面積



計測結果の例



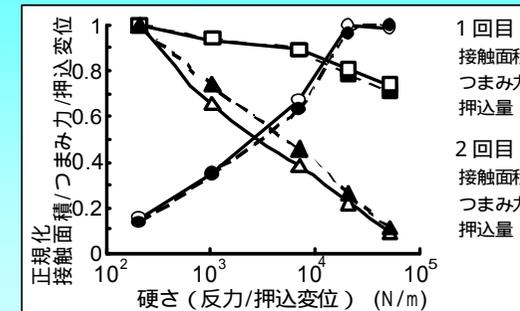
接触面積波形はつまみ力, 指先変位と大差なし

実験条件

- 課題 : 一対比較の柔らかさ識別 (同一柔らかさ含む)
 - 識別率はほぼ100%
 - 1つめの試料のつまみ動作のみ解析
- 柔らかさ: 5段階 (ゼラチン2種, シリコンゴム3種)
 - 21.4, 100, 687, 2070, 5280 (gf/mm)
- 被験者 : 10人 (Q1 ~ 37歳)
- 試行数 20 (全組合せ)
 - 試料あたり4回

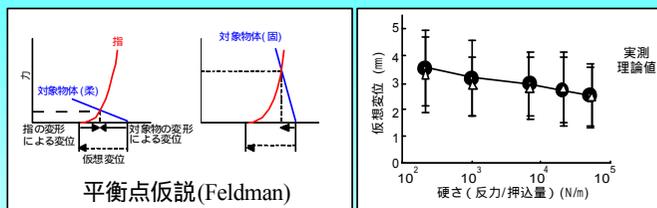


つまみ力, 指先変位, 接触面積のピーク値と柔らかさの関係



接触面積は柔らかさによらずほぼ一定
(傾きも同様 物理的飽和ではない)

仮想変位仮説による解釈



「人間は力ではなく筋の自然長を制御 (平衡点を変位 = 仮想変位制御) 関節角度は筋と対象物 (または拮抗筋) の弾性力の平衡点として決定される」 (つまみ動作に拡張 Van Doren)

対象物の柔らかさを知覚してフィードバックしなくても柔らかいものを「そっと」持つことができる。接触面積が一定に

柔らかさ提示との関連

接触面積が一定になるまでつまむとつまみ力のみから柔らかさ(押込量/力)を知覚可能



接触面積が一定値に到達するまでの接触面積増加速度 (圧受容器の発火受容器数は一定にして発火頻度増加率を増減)を制御すれば柔らかさを提示可能

柔らかさ知覚のためのつまみ動作のメカニズム

人間が柔らかさを知覚するときには

1. 仮想変位一定でつまむ
2. 接触面積が一定になる (柔らかいものは「そっと」把持) (発火圧受容器数は一定)

- (2重に上位中枢の処理が軽減される)
- ・フィードバックなしでも接触面積が一定
 - ・圧受容器の発火頻度のみが柔らかさに関係

弾性物体の柔らかさの認知と提示に関する実験的検討



1. 固有覚・触覚・視覚の寄与率



2. つまみ動作の法則性



3. 接触面積制御による柔らかさ提示



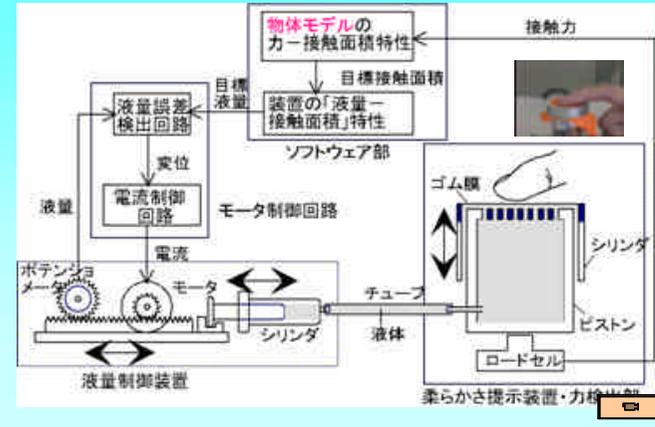
4. 受動的遠隔共有

3. 接触面積制御による柔らかさ提示

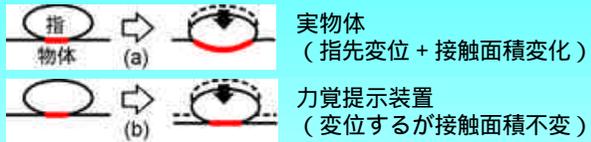
触れたときに接触面積が増加すると
本当に人間は「柔らかい」と知覚するのか



柔らかさ提示システムの構成

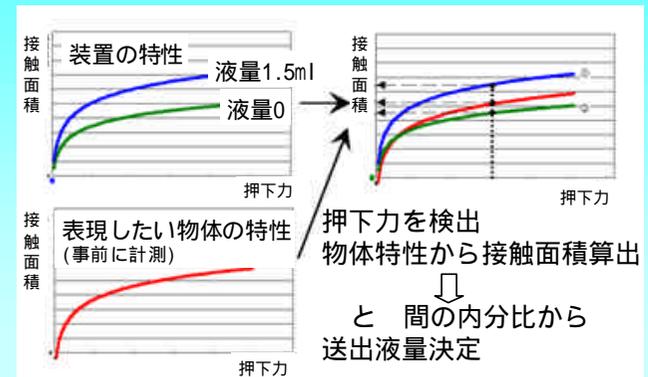


接触面積制御による柔らかさ提示

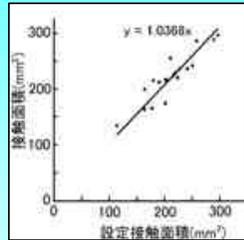
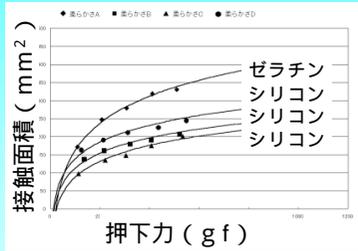


物体に加えられる**接触力**を検出して
指先との**接触面積**を制御
(接触面積制御の効果を証明するため変位は制御しない)

接触面積の制御方法

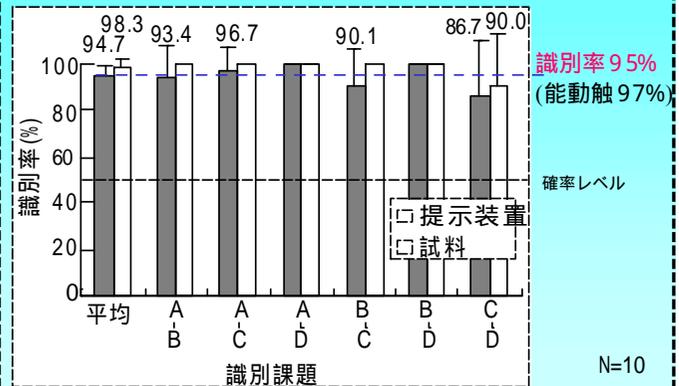


実物体の「接触力-接触面積」特性と再現結果



試作装置：押下力検出-接触面積制御により柔軟物の特性を再現

1. 柔らかさ識別実験結果 (受動触)



「柔らかさの違い」を表現可能

評価実験

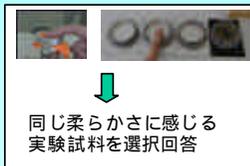
1. 柔らかさ識別 (相対的) (2つの柔らかさの識別)

- 1.1 能動触
- 1.2 受動触

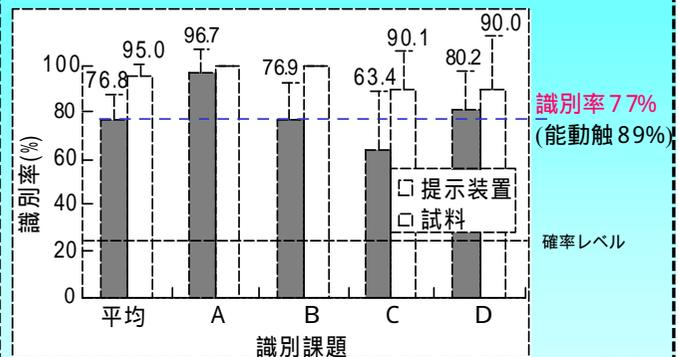


2. 柔らかさ認識 (絶対的) (実物体との比較)

- 2.1 能動触
- 2.2 受動触



2. 柔らかさ認識実験結果 (受動触)



「物体の柔らかさ」をある程度表現可能

本実験でわかったこと

- 柔らかさ識別率 97% (能動触), 95% (受動触)
- 柔らかさ認識率 89% (能動触), 77% (受動触)



- (物体の変形による変位を表現しなくても) 接触力検出-接触面積制御によって, 受動的に触れる場合を含め**物体の柔らかさを提示可能** (力覚提示装置では原理的に受動触時の柔らかさ表現は不可能)

4. 柔らかさ感覚の受動的遠隔共有

触覚制御は受動触でも柔らかさが提示可能だが, システムが複雑

力覚提示装置で近似的に実現できないか



弾性物体の柔らかさの認知と提示に関する実験的検討



1. 固有覚・触覚・視覚の寄与率



2. つまみ動作の法則性



3. 接触面積制御による柔らかさ提示



4. 受動的遠隔共有

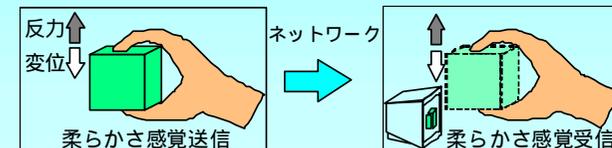
背景と目的

高速ネットワークの普及
力覚提示システムの普及



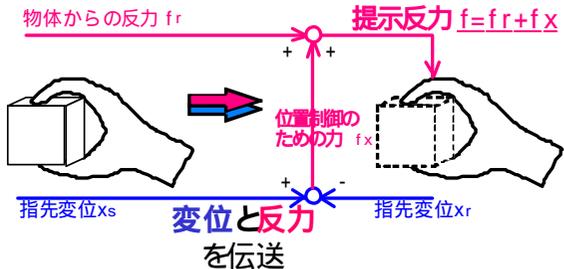
力触覚提示を伴う協同作業 (木村他1999, 廣瀬他2000)

弾性物体の柔らかさ感覚の遠隔共有
(遠隔触診などへの応用可能性)



柔らかさ感覚の受動的共有の問題

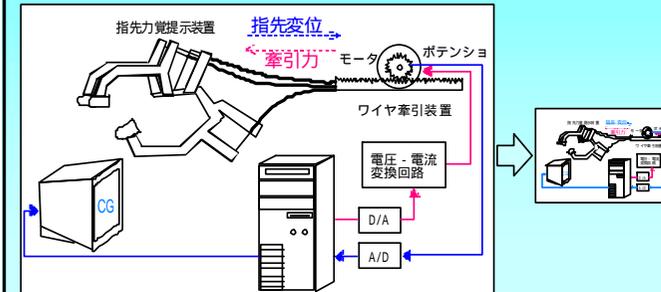
変位・反力伝送法



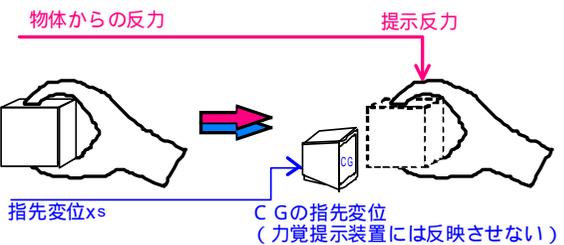
× :位置と力の同時制御は不可能
(提示される反力が本来の反力と異なる)

システム構成

- 指先反力提示システム(最大提示反力5 [N]) × 2
- ネットワーク



視覚を用いた受動的共有法



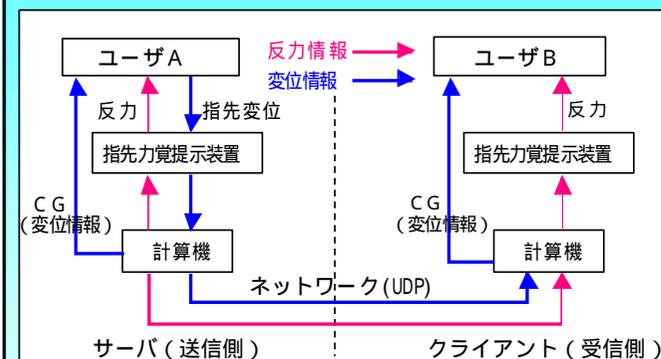
CGにより送信者の指先変位情報を提示

(弾性感覚の知覚において視覚による変位情報は固有感覚よりも優位 識別率差 6.8>1.4)

:2人の動作が同期, 2人の反力が一致

変位に関する固有感覚の矛盾—実験的検討

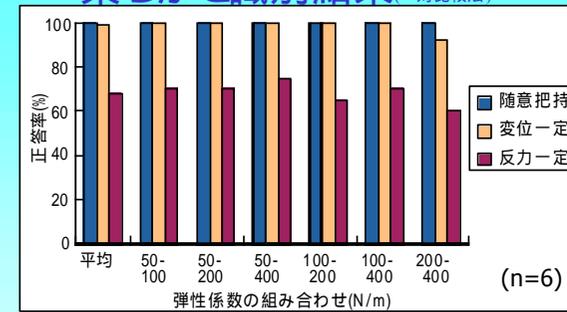
情報の流れ



評価実験

- **柔らかさ識別実験**
 - 知覚した柔らかさ**違い**の識別能力を検証
 - (一対比較法)
- **柔らかさ認識実験**
 - 知覚した柔らかさの**定量性**を検証
 - (調整法)

柔らかさ識別結果 (一対比較法)



- 柔らかさの違いを受動的に知覚可能
- 随意把持 = 変位一定 > 反力一定

柔らかさ識別実験

- 実験課題
 - 被験者に仮想物体の柔らかさを遠隔提示
 - 一対比較法による弾性の識別
 - 随意把持: 験者が仮想物体を随意的に把持
 - 変位一定: 最大押込量を一定に制御(10mm)
 - 反力一定: 最大反力を一定に制御(1N)
- 実験条件
 - 仮想物体弾性係数 (0, 50, 100, 200, 400 N/m)
 - 試行数10(全組合せ) × 3回 × 6名

柔らかさ認識実験

- 実験課題 (調整法による柔らかさの回答)

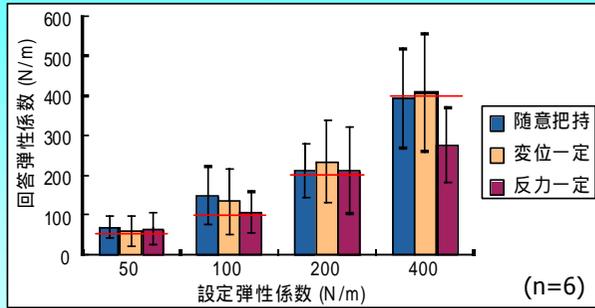
- 1: 受動的に弾性物体の柔らかさを遠隔提示
- 2: 能動的にローカルな仮想物体を把持
- 3: 遠隔提示により知覚した柔らかさと同程度になるよう仮想物体の弾性係数を調整

- 随意把持: 験者が仮想物体を随意的に把持
- 変位一定: 最大押込量を一定に制御(10mm)
- 反力一定: 最大反力を一定に制御(1N)

- 実験条件

- 仮想物体弾性係数 (50, 100, 200, 400 N/m)
- 試行数 4(各弾性) × 3回 × 3課題 × 6名

柔らかさ認識結果 (調整法)

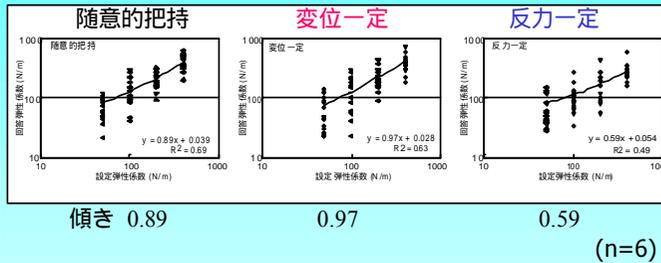


- 送信側と同程度の柔らかさと認識

本実験でわかったこと

- 人間の柔らかさ知覚のためのつまみ動作は「変位一定」に近い (仮想変位制御?)
- 「画像による変位提示」と「力覚提示装置による反力提示」によって、弾性物体の「柔らかさ」の受動的遠隔共有が可能

柔らかさ認識結果 (調整法)



- 変位一定でつまんだ時の反力を伝えると良好に柔らかさを認知 (反力一定は ×)
仮想変位制御仮説を間接的に支持

弾性物体の柔らかさの認知と提示に関して得られた実験的知見



触覚 > 視覚 > 固有覚



仮想変位一定 = 接触面積一定



接触面積増加率 (触覚) 制御で柔らかさ提示可能



視覚優位利用で受動的共有可能
変位一定提示が有効