

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23500675

研究課題名(和文)軽量小物体の精密把握運動における把握力制御について

研究課題名(英文)Precision grip force control during holding a light-weight object

研究代表者

木下 博(Kinoshita, Hiroshi)

大阪大学・医学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60161535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：健康成人を対象に手指での6gから200gまでの軽量小物体の精密把握運動中の把握力・持ち上げ力関係について調べた。重量が22g以下では把握面の摩擦状況に関わらず軽量程把握力/持ち上げ力比、把握力に占める安全領域の割合、力の変動係数が増大した。重量弁別実験および指先の物理的変化実験からは皮膚感覚情報が軽量物体把握時に減少することが示唆された。軽量域での把握力の変動増大と安全領域の上昇は、被験者自身が随意的に把握力を必要以上に上昇させていることも示しており、把握力の対費用効果が軽重量域では重い重量とは異なり対生理学的効率よりも対心理的安全性を重視する戦略が取られていることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：This study investigated precision grip force control while healthy adults were holding an object weighing 6 g to 200 g with sandpaper or rayon surface. Regardless of the surface material, the grip-force-to-load-force ratio assessed during the static holding phase was highest at the 6-g weight, the coefficient of variation in static grip force, the coefficient of static friction, and relative safety margin. Contact area and pad deformation with grip force measured suggested that the population of tactile units activated could be decreased during light-weight holding. The weight discrimination test further revealed a clearly decreased ability of weight perception in the low-weight range. The findings suggest that grip force control for light-weight holding demands a greater degree of psychological cost than that for heavy-weight holding, and that individuals use greater grip force to lessen such cost though it may increase physiological cost slightly.

研究分野：運動制御学、運動生理学、神経科学、バイオメカニクス

キーワード：精密把握 重量 把握面摩擦 接触面積 重量弁別 把握力安定性 安全領域 把握力/持ち上げ力比

1. 研究開始当初の背景

ヒトの日常生活で必要となる上肢での諸作業において、手指で物体を把握・保持する機能が果たしている役割は極めて大きい。この機能が基盤となって、物体の自由な移動から複雑な回転操作なども可能となっている。小物体を拇指と示指の先端部で摘む動作は、「精密把握」と称され、最も微細な力調節機能が関る。その力は把握物体と指先の摩擦状況および把握面に平行に働く接面力(持ち上げ力や接面トルク)の双方に依存して調節される。先行研究では、異なる摩擦状況の把握面における重量を 100 g から 800 g の幅で変化させた場合の把握力調節について調べられてきた。その結果、物体保持中の把握力(Static grip force: 安定把握力)は、接面力量(Load force: 物体重量や加速度)に比例して増大する。これらの調節には、保持者が物体を指先から滑り落とし時の力(Slip force: 最小把握力)に加えて余剰の把握力、すなわち安全領域(safety margin)が常に確保されている。この安全領域は、物体を指先から不意に滑り落とすことを防ぐ役割を果たしているが、通常小さめに調節されている。その背景には、把握力発揮に必要な指の屈筋活動量をなるべく少なくし、生理学的効率を上げるようにしていると考えられている。これらの関係が 100 g 以下の軽量物体でも同様になるのかは全く不明であった。

2. 研究の目的

本研究では、これまで測定装置が開発されず、全く手が着けられて来なかった 100 g 以下の軽量物体の把握運動における把握力制御方略を明らかにすることを目的とし、(1) 極めて軽量(6 g 程度)であり、把握力および持ち上げ力が同時に計測可能なセンサー内蔵型把握器を設計・製作する。(2) 健常成人を被験者として、本把握器で 200 g 以下の重量および異なる把握面摩擦の影響を安定把握力、最小把握力とその把握力の安全領域

の観点から検討する。(3) 軽量の物体操作時の把握力発揮に関わる指先の皮下組織変形および物体接触面積の影響、物体重量の弁別能力について検討する。(4) 健常高齢者を用いて同様の測定を実施し、加齢の影響について検討する。

3. 研究の方法

精密加工された鋼鉄性薄板にひずみゲージを貼付した超軽量力量センサー(重量 = 1.5g)3 台による把握器(6 g)を製作した(図 1)。各センサーの力分解能は 0.002N、であり 3N までの線形性が確認された。物体の重量は、6、8、10、14、22、30、410、50、70、90、110、130、150、200 g の 14 段階となるよう糸で付加重量を吊り下げた。高齢者実験では、6、50、110、200 g のみを使用した。把握面はサンドペーパーとレイヨンを両面接着テープで把握面に貼り付けた。

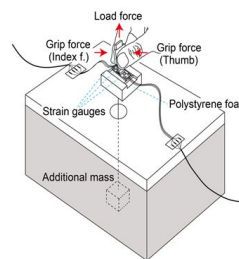


図 1 実験装置

被験者として健常青年 17 名(男性 9 名: 平均年齢 22.2±4 歳)および高齢者 17 名(男性 10 名、平均年齢 72.5±4 歳)を使用した。本研究は大阪大学大学院医学系研究科の倫理委員会の承認を得て実施された。

被験者には、拇指と示指先での把握動作で物体を机の上から持ち上げ、空間で 10 秒間保持し、ゆっくり指先離すことで物体を滑り落とさせた。各被験者は、各重量で 8 試行を各々の把握面下で実施した。測定される拇指および示指の把握力と物体の持ち上げ力から安定把握力/持ち上げ力比、把握力安全領域、滑り係数、安定把握力の試行内変動係数を求めた。すべての被験者に関して把握力と

指先の皮膚の変形との関係を位置センサーと力覚センサーによる装置で、および把握力と接触面積の関係について力覚センサーを装着したガラス面とビデオ装置で計測した。

重量弁別能検査は、本実験とほぼ同様の把握器（力センサーなし）を使用し、標準重量 10、24、48、112 g について各重量 5 段階（相対弁別域一定）の異なる重量との相違について 2 件法で調べ、ロジステック関数を用いて最小識別重量（ウェバー比 0.85 以上）を調べた。重量弁別については高齢者では実施できなかった。

3. 研究成果

安定把握力および滑り力は、重量増加にほぼ比例して増大した（図 2A）。安定把握力 / 持ち上げ力比（GF/LF ratio）は、滑りやすいレイヨン把握面においては滑り難いサンドペーパー面での値よりも常に大きかった（図 2B）。一方、重量に対する安定把握力 / 持ち上げ力比は、22 g 以下の重量において 200 g 重量での場合に比べて有意で曲線的な上昇が認められた。

安全領域（安定把握力 - から滑り発生時の把握力を引いた値）は、重量に応じて増大したが、安全領域の安定把握力に占める割合（相対安全領域）は、軽重量域で曲線的に増大した（図 2D）。相対安全領域には把握面の影響は認められなかった。

重量差の弁別実験の結果からは、軽重量域（標準重量 10g と 24 g）では、サンドペーパー面およびレイヨン面の双方でウェバー比（最小弁別値比）がより重い重量域よりも有意に増大した（図 3）。したがって、軽重量域においては指先からの求心性信号に基づく重量差比率の認知は、重い重量での重量差比率よりも難しいことが示唆された

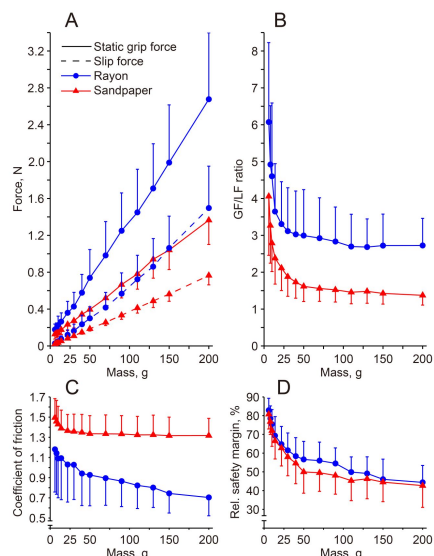


図 2 . 安定把握力、滑り力、安定把握力 / 持ち上げ力比、摩擦係数、相対安全領域と物体重量との関係

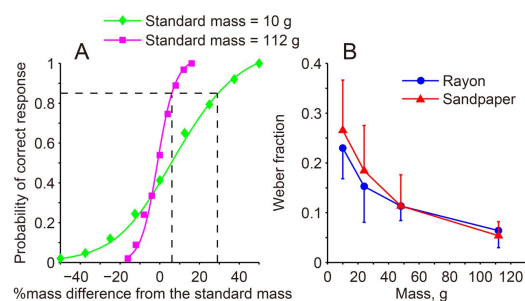


図 3 . 重量弁別実験の結果

把握力に対する指先と把握面の接触面積および皮膚の変位は、把握力の上昇に伴い曲線的（べき乗性）に増大した（図 4）。特に、把握力が 0.5N までの微小な把握力での面積および変位の変化が顕著であった。指先の触覚・圧覚受容器（マイスナー、メルケル、パチニ、ルフィニ）の数は、接触面積に依存し、各受容器の信号強度は変位に依存することが過去の研究から明らかにされているので、把握力の小さい域では、触圧覚の求心性信号が少なくなり、軽量物体の把握時における微小な把握力（<0.4N）ではそれがより顕著となることが示唆された。

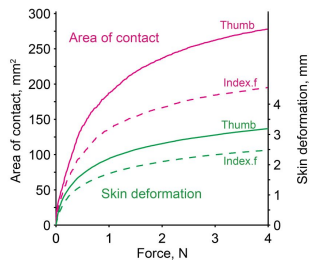


図4. 指先の物体接触面積と把握力関係

これらの結果から軽量域での把握力増大は、指先からの求心性信号の減少とそれに伴う中枢制御系での重量差別機能の低下により、微細な把握力操作が困難であったことが関連していた可能性が示唆された。これらの機能減を補償するために脳は随意的に発揮される安全領域を上昇させる戦略を採っていた可能性が高い。その意味では、生理学的効率(把握力のための筋力発揮)を低下させ、心理的効率(落下防止への安全性)を高めるコスト・パフォーマンス方略が軽重量域では採られるものと考えられた。

滑り時の把握力と持ち上げ力から推定された滑り係数值は、100 g以上の重量ではレイヨン面で0.7前後、サンドペーパー面で1.35前後であった(図2C)。係数值は、どちらの把握面でも物体重量が22 g以下で明らかに上昇し、より滑りにくい状況となっていた。滑りにくい把握面で把握力を減少させて生理学的効率を上げることについては、これまでの研究報告と一致したが、軽量域で摩擦係数が上昇すること、把握力との関係についてはよく知られていなかった。今回の結果は、把握面状況に関わらず軽量域では把握力を上昇させており、摩擦係数の結果も上記で示唆された生理学的効率よりも心理学的効率重視の方略説を支持するものであった。

把握力の安定性についての把持中4秒間の力の標準偏差は、重量の増大に伴い増加した(図5A)。一方、安定把握力の変動係数(CV)では、両把握面において軽重量域で顕著な増加が認められた。200 gでのCV値に比べてレイヨン面で30g以下、サンドペーパー

面では14 g以下で有意な差異が認められた。したがって、軽重量域では微細な把握力を一定に保つことがより困難であることが示唆された。微細な把握力を安定して発揮することの困難さも軽重量域での心理的効率重視の戦略への転換に寄与しているものと推察された。

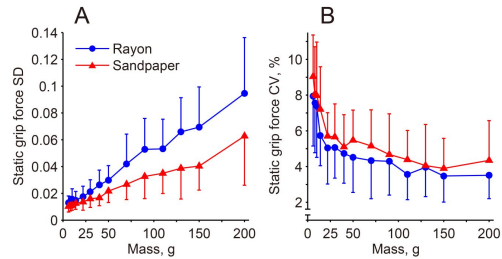


図5. 安定把握力の安定性

健康高齢者を対象とした実験結果からは高齢者では安定把握力および滑り力が若者よりも大きく(図6A:若者、B:高齢者)、それに伴い安定把握力/持ち上げ力比も高齢者では顕著に大きかった。特に、滑りやすいレイヨン面でそれが顕著であった。また、滑り力も高齢者では大きく、これにより摩擦係数は若者よりも小さかった。これについても特にレイヨン面でその差や明らかであった(図7)。

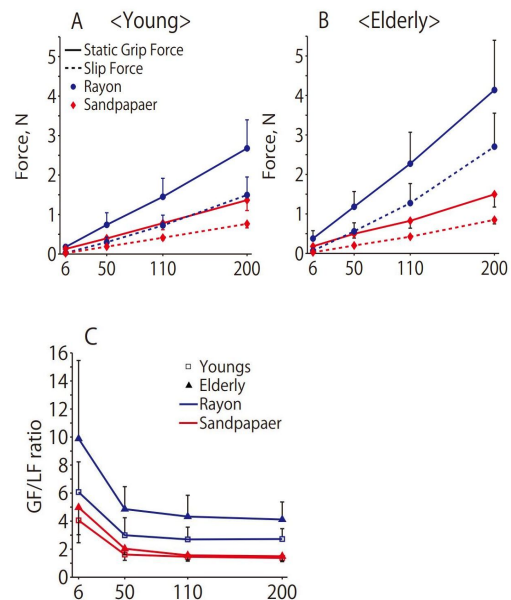


図6 若者と高齢者での結果

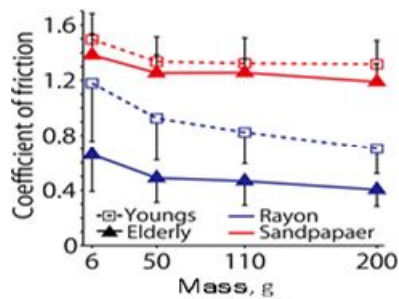


図7 若者と高齢者の指先の滑り係数

一方、高齢者の相対安全領域は、若者と類する値となり、軽物体重量では、値が増大した(図8)健康な高齢者では随意的に発揮される指先の力が大きく、それに伴い安全領域の絶対量も大きくなることが明らかとなった。これらの調節は、指先の皮膚摩擦抵抗が減少していることによるものであることも示唆された。他方、安定把握力に占める安全領域の比率(相対安全領域)が軽量域で上昇する点は若者と同様であり、制御戦略は、健康的な状況での加齢によっては差ほど変化しないことが示唆された。指先を使った精密把握運動は、健康な人間では加齢に関わらず頻繁に使用されるため、おそらくこの機能自体は加齢の影響を強く受けないものと推察された

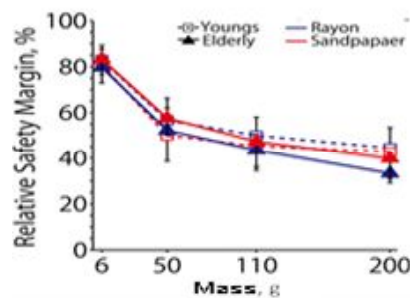


図8 . 若者と高齢者の相対暗線領域値

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

Hiramatsu Y, Jinnouchi H, Kimura D, Ito T, Kadota K, Kinoshita H., Development of an apparatus for the examination of prehension force while lifting a light-weighted object, *Archives of Physical Medicine and*

Rehabilitation, 93 (10), pp 18, 2012
平松佑一, 陣内裕成, 木村大輔, 伊東太郎, 門田浩二, 木下 博: 精密把握運動時の力調節. 第21回運動学習研究会論文集, pp 103-107, 2012.

平松佑一, 木村大輔, 門田浩二, 伊東太郎, 木下 博, 精密把握力調節における物体重量と把握面素材の影響, 第35回バイオメカニズム学術講演会論文集, 145 - 148, 2014.

平松佑一, 木村大輔, 陣内裕成, 伊東太郎, 門田浩二, 木下 博, “精密把握運動時の力調節と指腹部特性”, 理学療法学, 41(1), p55, 2014. 2015

Hiramatsu Y, Kimura D, Ito T, Kadota K, Kinoshita H. Control of precision grip force in lifting and holding of lightweight objects, PLOS ONE, (印刷中),

[学会発表](計13件)

平松佑一, 陣内裕成, 木村大輔, 伊東太郎, 門田浩二, 木下 博: 精密把握運動時の力調節. 第21回運動学習研究会, 大阪, 2012.6.6

木下 博, 平松佑一, 門田浩二, 伊東太郎: 精密把握運動制御研究のための超軽量把握器の開発. 第67回日本体力医学会大会, 岐阜, 2012.9.14-16

Yuichi Hiramatsu, Hiroshige Jinnouchi, Daisuke Kimura, Koji Kadota, Taro Ito, Hiroshi Kinoshita: Development of an apparatus for the examination of prehension force while lifting a light-weighted object, 89th ACRN-ASNR Annual Conference, Canada, 2012.10.9-13

平松佑一, 陣内裕成, 木村大輔, 伊東太郎, 門田浩二, 木下 博: 軽量物体の精密把握力調節. 第48回日本理学療法学会大会, 名古屋, 2013.5. 24-26

Yuichi Hiramatsu, Hiroshige Jinnouchi, Daisuke Kimura, Taro Ito, Koji Kadota, Hiroshi Kinoshita : Control of prehension force during holding of a light object, Neuro2013, Kyoto, 2013.6. 20-23

Yuichi Hiramatsu, Daisuke Kimura, Hiroshige Jinnouchi, Taro Ito, Koji Kadota, Hiroshi Kinoshita :

Development of a light apparatus for the assessment of fine prehension force in stroke patients, WCPT-AWP & ACPT 2013, Taiwan, 2013.9. 5-9

Yuichi Hiramatsu, Daisuke Kimura, Hiroshige Jinnouchi, Taro Ito, Koji Kadota, Hiroshi Kinoshita : Prehension force for lifting a light-weight object, Neuroscience 2013, San Diego, 2013.11. 9-13

Yuichi Hiramatsu, Daisuke Kimura, Hiroshige Jinnouchi, Satoshi Obata, Taro Ito, Koji Kadota, Hiroshi Kinoshita: Increased safety margin of grip force and perceived heaviness when holding of an light weight object by the precision grip, Asian-South Pacific Association of Sport Psychology 7th International Congress, 2014年08月,

平松佑一, 木村大輔, 陣内裕成, 伊東太郎, 門田浩二, 木下博 : 精密把握運動時の力調節と指腹部特性 . 第49回日本理学療法学会大会, 横浜, 2014.5.

平松佑一, 木村大輔, 門田浩二, 伊東太郎, 木下博 : 精密把握力調節における物体重量と把握面素材の影響 第35回バイオメカニズム学術講演会, 2014年11月, 岡山

Yuichi Hiramatsu, Daisuke Kimura, Koji Kadota, Taro Ito, Hiroshi

Kinoshita. Grip force control for holding of a light object by elderly people, The 44th annual meeting of Society of Neuroscience, Washington, DC, 2014.

Yuichi Hiramatsu, Daisuke Kimura, Koji Kadota, Taro Ito, Hiroshi Kinoshita Aging affects prehension force control for holding light objects, World Confederation for Physical Therapy, Singapore, 2015.5.1-4

平松佑一, 木村大輔, 陣内裕成, 伊東太郎, 門田浩二, 木下博 : 高齢者における軽量物体の精密把握力調節 . 第50回日本理学療法学会大会, 東京, 2015.6.5-7

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木下博 (Kinoshita Hiroshi)

大阪大学大学院・医学系研究科・教授

研究者番号 : 60161535

(2) 研究分担者

門田浩二 (Kadota Koji)

大阪大学大学院・医学系研究科・助教

研究者番号 : 50557220

伊東太郎 (Ito Taro)

武庫川女子大学 体育健康科学部

研究者番号 : 40248084

(3) 研究協力者

平松佑一 (Hiramatsu Yuichi)

木村大輔 (Kimura Daisuke)