

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：34601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500336

研究課題名(和文)物体の持ち上げ時に知覚される重さに関する基礎的研究 - 慣性力情報の処理機構 -

研究課題名(英文)Effects of inertia tensor on perceived heaviness of lifted objects.

研究代表者

川合 悟 (KAWAI, Satoru)

帝塚山大学・心理学部・教授

研究者番号：90177634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：持ち上げ時に知覚される物体の重さへの慣性力の影響を検討した。慣性力は指先の物体接触面から物体までの距離(作用点 - 重心)および軸周りの質量分布に影響される。故に同じ質量で大きさ(3水準)および距離(3水準)が異なる9種類の竿付立方体を用い、これら刺激から知覚される重さの変化から、距離(実験1)および大きさと距離(実験2)の影響を調べた。実験1からは距離の増大は重さの増大を生じた($p < .05$)。実験2からは距離の増大 + 大きさの減少は重さの増大(あるいはその逆)を生じたが、両要因の拮抗関係が崩れると重さは複雑に変化した。そこで複雑な両要因の影響を量的・組織的に説明できるモデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：Effects of inertia tensor or rotational dynamics of lifted objects on perceived heaviness were investigated. Inertia tensor is known to be affected by a distance between the point of action on the human fingers and the center of gravity of a lifted object and by a mass distribution of the lifted object. Thus, using cubes with the same mass but different sizes (3 levels) --- attached with rods with the different length (3 levels), the effects of distance (experiment 1) and size by distance (experiment 2) on perceived heaviness when subjects compared among these cubes. Experiment 1 indicated that perceived heaviness significantly increased with a distance and vice versa ($p < .05$). Experiment 2 indicated that perceived heaviness significantly increased when increase in distance and decrease in size occurred simultaneously and vice versa. However, perceived heaviness complexly changed once this antagonistic relationship was broken, which was discussed using a quantitative model.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：感覚 重さ 異種感覚統合 慣性力

1. 研究開始当初の背景

持ち上げ時に知覚される物体の重さは、物体のさまざまな物理的要因や個人の認知的要因の影響を受ける(図1; Kawai, 2012)。これまで、本研究者は知覚される重さ(Heaviness)に影響する要因の中から、強く影響する3つの要因、すなわち物体重量(Weight)、指先から得られる大きさ(Haptically perceived size)、密度(Density)(Kawai, 2002a, 2002b, 2003a, 2003b)および視覚から得られる大きさ(Visually perceived size)の影響について検討してきた(Kawai et al., 2007)。

そして、もう一つ慣性力(Inertia tensor)については、その影響が重さに対して決定的であることは多く報告されている(Solomon et al., 1989; Burton et al., 1990; Turvey, 1990; Amazeen & Turvey, 1996; Amazeen, 1997, 1999; Amazeen, & Jarrett, 2003; Shockley, 2004)。

しかし慣性力の知覚を可能にする情報処理機構すなわち神経解剖学的・生理学的機構については全くと言っていいほど説明されていない。

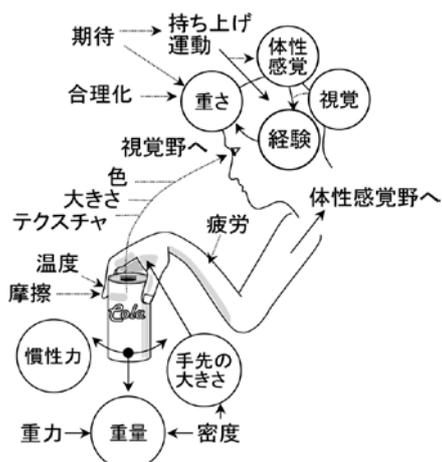


図1. 重さへの影響因子(Kawai et al., 2012)

2. 研究の目的

持ち上げ時に物体に生じる慣性力が知覚される重さに与える影響を調べ、物体の物理的特性と知覚される重さとの関係を詳細に検討し、さらに、その情報処理機構を解明することを目的とした。

そのため、(1) 人間の知覚する重さは物体の慣性力によって影響されるのか追試し、影響が確認されれば(2) 慣性力は心理学的感覚である重さとしてどのように組み込まれ知覚されているのか、また(3) その慣性力はどのような神経生理学的情報に変換され知覚されるのか考察することとした。

3. 研究の方法

(1) 重さへの慣性力の影響の検討

慣性力は物体を把握する指先表面から物体重心までの距離(Distance)や軸周りの質量分布(Mass distribution)の違いによって生

じると考えられる。それゆえ実験1では距離の影響が、実験2では大きさと距離の相互作用を検討した。

① 実験用具: 質量分布を統制するために質量が同じ(約35g)で大きさの異なる3種類(一辺がS: 30mm, M: 40mm, L: 50mm)の立方体を用いた。さらに把握支点-重心間距離を統制するために異なる長さの亚克力棒(50、75、100mm)をこれら立方体に装着した。9種類(3 size×3 distance)の刺激をそれぞれ2つずつ準備した。

手指の感覚機能および運動機能に支障のない18名(女性9名、男性9名)の成人被験者が9種類の刺激から選ばれた2つの刺激の把握部分を把持して一つずつ持ち上げ、知覚される重さを三件法(重たい・軽い・同じ)で答えた(図2)。被験者の開いた指の間に実験者が手渡し、一つめの刺激の重さを2度持ち上げ、重さを記憶したあと、基に戻した。その後、実験者が二つ目の刺激を指の間に入れた。刺激は高さを一定にするため、調節用の箱を置いた。

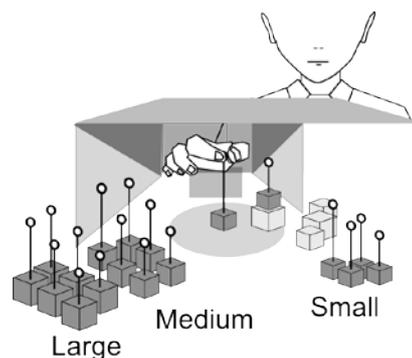


図2. 実験手続き

② 実験の試技

実験1(距離の影響)では、大きさは一定とし(S vs. S, M vs. M, L vs. L)、すべての距離の組合せ(9種類)に対してそれぞれ6試技ずつ実施した。被験者は162試技(6 trials×9 combinations×3 blocks)行った。

実験2(距離×大きさの影響)では、距離だけでなく大きさも変化した(S vs. M, S vs. L, M vs. L, M vs. S, L vs. S, L vs. M)、すべての距離と大きさの組合せ(9種類)に対してそれぞれ4試技ずつ実施した。被験者は216試技(4 trials×9 combinations×6 blocks)であった。

いずれの実験においても、条件の提示は被験者間でカウンターバランスをとり、各ブロックの試技は疑似ランダムに配置した。

③ データの処理および分析方法

三件法(重たい・軽い・同じ)の結果および知覚される重さが「同じ」と報告された割合に対して対応のある分散分析を用いた。

④ 持ち上げ装置 (Lifting simulator) の製作
 目的 (2) および (3) の達成のために、持ち上げ装置を製作した。すなわち人間が慣性力を知覚しているとするならば、刺激を保持した際に手指を通じて、慣性力または慣性力と相関の高い物理的情報が伝達されると仮定できる。そこで、その情報が伝わると仮定しその情報を同定一定の速度、力変化、高さで持ち上げたとき、各刺激の呈する力の成分から慣性力と相関のある情報を見出すことにした。

図3はステップモーター (株式会社エンタルモーター製) によって速度・高さ・トルクなどを一定にして刺激を持ち上げるための装置 (Lifting simulator) である。

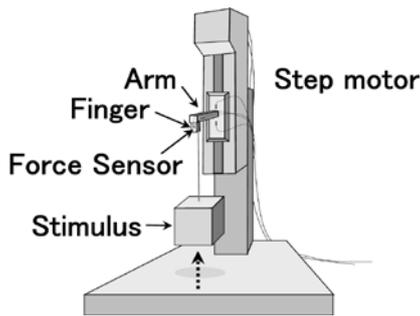


図3. Lifting simulator (H23 年型)

平成 23 年型では、一軸センサー (株式会社共和電業社製) によって上下 (z 軸) 方向の力成分のみ検出するものだった。

しかし、持ち上げ運動には前腕の屈曲に伴う回転運動を伴うことを考慮し、平成 24 年型では、回転運動を含み、かつ三軸センサー (株式会社テック技販) によって上下 (z 軸)、前後 (y 軸)、左右 (x 軸) 方向の力成分を検出できるものとした (図7参照)。

4. 研究成果

(1) 重さへの慣性力の影響

① 実験 1 の結果

表1は、各距離および各大きさにおける全被験者の主観的応答 (重たい・軽い・同じ) の割合の平均値 (%) を示している。図4は、表1を基に S vs. S 条件における結果を示した。傾向は M vs. M および L vs. L 条件においてもほぼ同様であった。

表1. 主観的応答の割合 (実験1) (%)

Condition	d	2nd cube								
		5			7.5			10		
		Heavier	Similar	Lighter	Heavier	Similar	Lighter	Heavier	Similar	Lighter
Small vs. Small	5	11.4	83.3	5.3	34.1	56.1	9.8	65.2	31.1	3.8
	7.5	6.1	61.4	32.6	7.6	84.8	7.6	31.1	61.4	7.6
	10	0.8	37.1	62.1	11.4	56.8	31.8	6.8	85.6	7.6
Medium vs. Medium	5	10.6	84.8	4.5	22.7	67.4	9.8	40.2	43.9	15.9
	7.5	8.3	67.4	24.2	9.8	78.8	11.4	28.0	63.6	8.3
	10	3.0	52.3	44.7	10.6	68.2	21.2	9.1	87.1	3.8
Large vs. Large	5	9.8	84.1	6.1	18.9	74.2	6.8	37.1	49.2	13.6
	7.5	9.1	67.4	23.5	11.4	84.1	4.5	21.2	67.4	11.4
	10	8.3	59.1	32.6	5.3	76.5	18.2	9.1	87.1	3.8

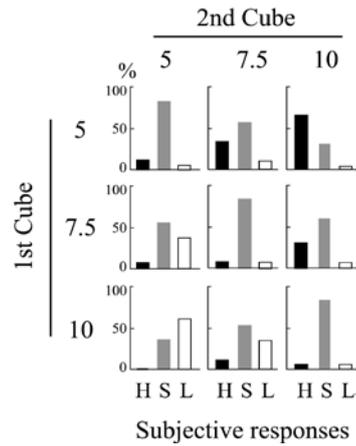


図4. 主観的応答の割合 (S vs. S 条件)

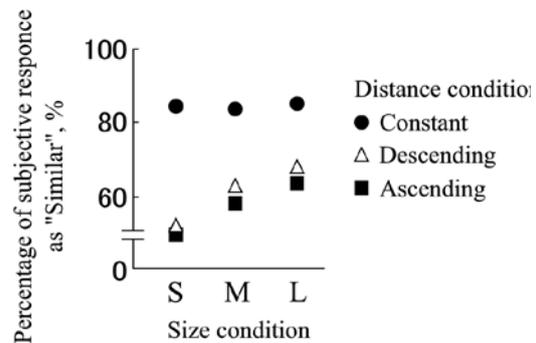


図5. 距離の変化別にみた「同じ」に対する主観的応答の割合 (%)

図5は、距離の変化 (一定: Constant, 上行: Ascending, 下行: Descending) 別にみた「同じ」と答えた主観的応答の割合を示している。実験1からは、距離を変化させると知覚される重さが有意に変化し ($p < .05$)、両刺激の距離の差が大きくなるほど重さへの影響は大きくなった (表1 / 図4)。また、同じ距離 (Constant) 条件では大きさに関係なく 80% 以上の試技で「同じ重さ」に知覚された。また、下行 (Descending) 条件の方が上行 (Ascending) 条件よりも距離の影響は有意に大きく、同じと知覚される割合が小さくなった (図5)。

② 実験 2 の結果

表2は、各距離および各大きさを変化させた時の主観的応答 (重たい・軽い・同じ) の割合を示している。

また、図6は大きさと距離の変化を伴う実験2の主観的応答の割合を図示したもので、6水準のうち S vs. M 条件 (左) および M vs. S 条件 (右) の結果である。

表2. 主観的応答の割合(実験2)(%)

Condition		d	2nd cube								
1st cube	2nd cube		5			7.5			10		
	vs.		Heavier	Similar	Lighter	Heavier	Similar	Lighter	Heavier	Similar	Lighter
Small	vs. Medium	5	5.7	70.5	23.9	6.8	85.2	8.0	38.6	46.6	14.8
		8	2.3	36.4	61.4	10.2	52.3	37.5	6.8	79.5	13.6
		10	0.0	8.0	92.0	0.0	30.7	69.3	5.7	43.2	51.1
Small	vs. Large	5	10.2	46.6	43.2	11.4	68.2	20.5	6.8	83.0	10.2
		8	1.1	22.7	76.1	4.5	31.8	63.6	11.4	45.5	43.2
		10	0.0	3.4	96.6	0.0	13.6	86.4	0.0	35.2	64.8
Medium	vs. Large	5	5.7	70.5	23.9	19.3	76.1	4.5	31.8	55.7	12.5
		8	10.2	48.9	40.9	14.8	63.6	21.6	13.6	81.8	4.5
		10	6.8	31.8	61.4	10.2	50.0	39.8	17.0	60.2	22.7
Medium	vs. Small	5	39.8	52.3	8.0	60.2	28.4	11.4	89.8	10.2	0.0
		8	10.2	86.4	3.4	43.2	48.9	8.0	69.3	25.0	5.7
		10	1.1	73.9	25.0	21.6	70.5	8.0	55.7	37.5	6.8
Large	vs. Small	5	40.9	46.6	12.5	68.2	25.0	6.8	92.0	8.0	0.0
		8	30.7	55.7	13.6	59.1	37.5	3.4	89.8	9.1	1.1
		10	13.6	76.1	10.2	37.5	48.9	13.6	69.3	29.5	1.1
Large	vs. Medium	5	22.7	67.0	10.2	38.6	44.3	17.0	61.4	31.8	6.8
		8	1.1	90.9	8.0	29.5	60.2	10.2	37.5	59.1	3.4
		10	4.5	63.6	31.8	10.2	85.2	4.5	36.4	50.0	13.6

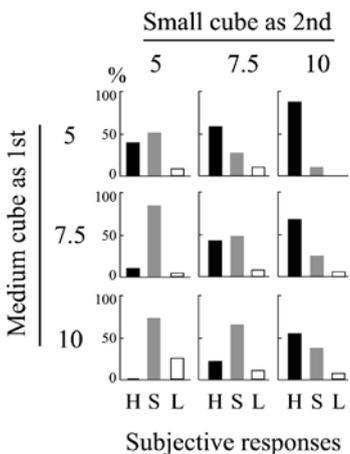
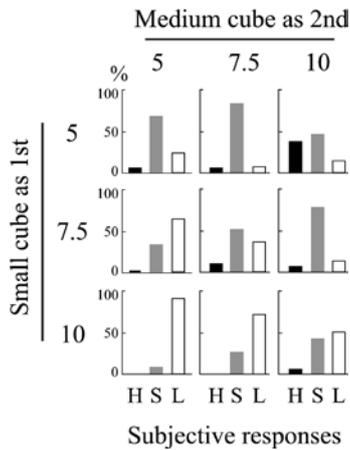


図6. 主観的応答の割合(上; S vs. M 条件、下; M vs. S 条件)

実験2の結果からは、両刺激が同じ質量(50g)にも関わらず「距離」および「大きさ」の両要因の影響を受けた($p < .05$)。両要因の影響は複雑で、質的には第1刺激と第2

刺激間で、質的には距離の増大または大きさの減少によって知覚される重さの増大が生じ、距離の減少または大きさの増大によって重さの減少が生じている(表2/図6)。

しかしながら両要因の量的な増減の方向性が変化すると、知覚される重さは複雑になり重たく感じたり、軽く感じたりした。つまり2要因の量的増減の相互作用の結果によって主観的な重さは複雑に変化すると推察された。

(2) 慣性力は心理学的にはどのように表現されるのか

結果(1)において慣性力が知覚される重さに影響することが明らかになったため、慣性力は心理学的感覚である重さとしてどのように組み込まれ知覚されているのか考察した。

実験1および実験2の質的・量的変化から、知覚される重さに対する慣性力は、質的には支点-重心距離が増加または促進的であり、大きさ(質量分布)に対しては減少または抑制的であった。量的には、さらなる被験者数による検証が必要と思われるが、おおむね、慣性力を、質量、質量分布、距離の3要因で近似できる可能性が得られた。

先行研究では、人間は慣性力そのものを知覚していると考えており、(Solomon et al., 1989; Burton et al., 1990; Turvey, 1990; Amazeen & Turvey, 1996; Amazeen, 1997, 1999; Amazeen, & Jarrett, 2003; Shockley, 2004)、質量と距離の2要因で重さに反映するとしていたが、本研究結果では、さらに質量分布を考慮したモデルの方が知覚される重さを反映することが提案できる。

(3) 慣性力は神経生理学的にどのように表現されるのか。

物体の慣性力はどのような神経生理学的モデルによって慣性力を表現しているかである。つまり人間は物理的世界の慣性力を、神経生理学的にどのように変換、検出し知覚しているかである。

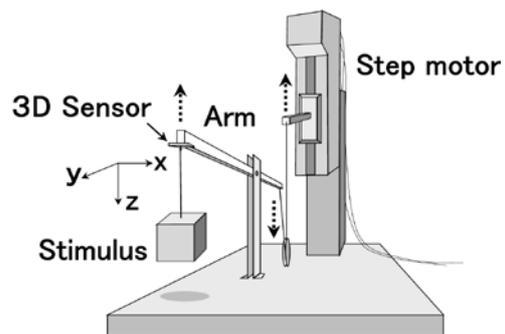


図7. Lifting simulator(H24 年型)

それゆえ、一定の持ち上げ様式・速度（100mm/s）・高さ（20mm）で持ち上げが再現できる持ち上げ運動装置（図7. Lifting simulator）を製作し、実験1および2で用いた刺激を一定の速度で持ち上げた時に生じる力の成分を3軸力覚センサーで力成分を解析した。

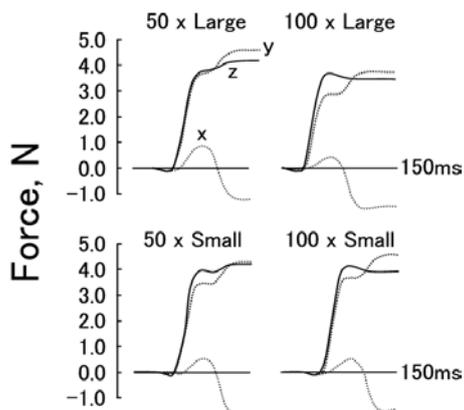


図8. Force Sensor への力応答(x: 左右、y: 前後、z: 上下方向)

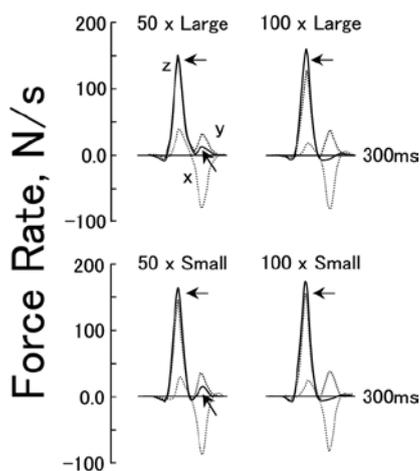


図9. Force Rate(x: 左右、y: 前後、z: 上下方向)

図8は、それぞれの条件で10回ずつ持ち上げたときの平均の力曲線を表している。各条件によって、x軸（左右）、y軸（前後）、z軸（上下）方向力の応答変化が観察された。

図9は、それぞれの単位時間当たりの力の変化率を示している。この図から明らかなように、z軸にはピークには大きな変化は見られなかったが、y軸のピーク値は条件によって変化した（矢印）。特徴的であったのは50mmの長さにおけるz軸における第2ピークの出現である（矢印）。これらのことは、物体の大きさや指先（支点）から物体重心までの距離の変化によって、指先に伝達する力が変わること示唆している。

振り子においては、質点が小さくかつ振れ幅が小さい場合には周期は質量や振幅には関係なく一定で、距離にのみ影響を受けると

いわれている。しかし本研究結果からは、刺激が質点とみなせるほど十分に小さくなく単振り子というよりはむしろ物理振り子の性質に従った可能性があるといえる。つまり単振り子での距離の影響は支点から質点までと考えられるが、物理振り子での距離の影響は支点から重心までの距離ではなく質量が分布する範囲まで及ぶと考えられている。つまり、これらの性質によって、指先に到達する各方向の力に変化が見られると考えられる。

これまで皮膚表面で生じる物体のトルクによって物体を把握する力が影響を受けることは報告されている（Kinoshita et al., 1997）。本研究では指先表面から重心までの距離は一定にしたため、支点から質量のおよぶ範囲が変化し慣性モーメントを変化させ周期を変化させたのではないかと、そしてこの周期変化が皮膚および固有受容器の手がかり情報として加味され、知覚される重さにも影響しているのではないかと推察した。

(4) まとめ

- ① 持ち上げ時に知覚される物体の重さへの慣性力の影響について検証した。慣性力を左右する把握面と物体重心との距離が長くなると知覚される重さは大きくなる傾向がみられた。また慣性力を左右する物体重心に広がる質量分布（大きさ）は質量分布が小さくなるほど重さは大きくなった。しかし距離との相互作用によって知覚される重さは複雑な影響を呈した。
- ② 知覚される重さに対する距離および大きさの複雑な影響の背景には、両者の何らかの定量的法則が存在すると仮定し、質量、質量分布、距離の三要因から慣性力-重さモデルが提案され、これまでの質量、距離モデルと比較された。
- ③ 慣性力情報は感覚生理学的にどのように検出するかを検討するため、それぞれの刺激物体を持ち上げた時に生じる力の変化特性を解析した。質量分布の変化が慣性モーメントおよび周期に影響させたことにより知覚される重さに影響したのではないかと推察された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計0件）

〔学会発表〕（計4件）

- ① 川合 悟、“運動制御（体育）から運動感覚（心理）へ - from Motor Control to Haptics -”、第3回健康運動科学懇話会（於：帝塚山大学）、2013年6/1.
- ② 川合 悟、“知覚-行動実験室(Perception

-Action Laboratory) のめざすこと”、帝塚山大学大学院・心理科学研究科開設記念学術講演会（於：帝塚山大学）、2012年7/10.

- ③ 川合 悟、“Tryout Project : 「戦力外通告」を受けた選手の気持ちでもう一度 ID を探しに頑張ってみよう、-Computer graphic and PHANToM haptic displays: Powerful tool to understand how humans perceive heaviness-”、第5回帝塚山大学心理学研究会（於：帝塚山大学）、2011年9/29.
- ④ 川合 悟、“人間はなぜ、物体を”うまく”持ち上げ操作できるのか? ”、中京大学大学院運動生理学研究科春季セミナー（於：白馬高原ホテル）、2011年3/8~9.

〔図書〕（計2件）

- ① 川合 悟、“運動学習（第6章）”、“知覚と運動の連携（第7章）”（査読有）、心理学概論（水野邦夫・向井稀宏編）、2015、ナカニシヤ出版（出版予定）
- ② Kawai, S., MacKenzie, C. L., & Faust, P., Phantom Graphic and Phantom Haptic Displays: Powerful Tools to Understand How Human Perceive Heaviness, Chapter 2, Haptics Rendering and Applications, [Saddik, A.El. (Ed.)],（要約、フルテキストの査読有）、2012, pp.25-46, Croatia: InTech Open Access Publisher.

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川合 悟 (KAWAI Satoru)
帝塚山大学・心理学部・教授
研究者番号：90177634

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：