

歩行中の手先振動を抑制する方策に対する UCM 解析

東郷 俊太^{†a)} 香川 高弘[†] 宇野 洋二[†]

Uncontrolled Manifold Analysis for Strategy of Dampening Hand Vibration during Human Walking

Shunta TOGO^{†a)}, Takahiro KAGAWA[†], and Yoji UNO[†]

あらまし コップの水をこぼさずに歩行するというタスクを達成するために人間はどのような方策をとっているのかを調べた。手先のジャークを小さくし、コップの角度を一定に保つことがコップの水をこぼさないための性能変数とし、その制御のために各関節を協調させているという仮説を立てた。協調度を定量的に評価する UCM 解析を用い手先のジャークに関する分散とコップの角度に関する分散について、性能変数に影響を与えない成分 (UCM 成分) と与える成分 (ORT 成分) に分割した。水が入っているコップを保持して歩行する場合と水が入っていないコップを保持して歩行する場合を比較する実験を行い、水が入っている場合に手先のジャークは小さくなり、コップの角度の分散も小さくなることを確認した。また各分散成分とも、UCM に沿った成分は ORT に沿った成分より大きかった。以上の結果から人間はコップの水をこぼさずに歩行するために、各関節を協調させてコップの角度を一定に保ち、手先のジャークを小さくしていることが示唆された。またコップの角度に関する分散成分が時系列によってほとんど変化しない結果から、タスク全体で振動を抑制していることが示唆された。

キーワード 歩行, 振動, シナジー, ジャーク, UCM 解析

1. ま え が き

人間には自然に行うことのできる巧みな運動というものがたくさんある。その働きや制御方策を知ることには人間の脳や中枢神経系の働きを理解する上で有益である。ではここで巧みな運動とはいったいどのような運動のことをいうのであろうか。Bernstein [1] は巧みさとは“あらゆる状況ならびにあらゆる条件下において解決策となる運動を見つけること”と定義し、人間が巧みな運動を実現するために冗長性をうまく利用していることを指摘した。このような人間の冗長性に関する問題は Bernstein 問題と呼ばれ研究されてきた。Bernstein 自身は冗長性を克服するために中枢神経系は“シナジー”と呼ばれる構造単位で多要素を制御していることを指摘した。

巧みな運動の一例として“コップの水をこぼさずに歩行する”というタスクについて考える。このタスク

は全身運動であるので多くの自由度を制御しなければならない。よってこのタスクを達成するためにはシナジーの利用、すなわち各部位の協調動作が重要であると考えられる。

協調を定量的に評価するために UCM (UnControlled Manifold) 解析と呼ばれる解析手法が提案された [2], [3]。UCM 解析はある性能変数 (例えば手先位置) に関する冗長性をもつ多要素 (例えば関節角) のトライアル間にわたる分散を二つの直交する成分に分割する。一つは性能変数の値に影響を及ぼさないような多要素の組の空間 (UCM) であり、もう一つはこの UCM 空間に直交し、性能変数の値に直接影響を及ぼす多要素の組の空間 (ORT: orthogonal) である。注目する性能変数が冗長性のある多要素の協調により制御されているならば、UCM 空間の分散は、ORT 空間の分散よりも高い値を示す。

UCM 解析は先行研究において、様々なタスクにおける協調を定量化するために用いられてきた。姿勢制御タスク [4] ~ [8]、多指による力の生成タスク [9] ~ [13]、ポインティング、リーチングタスク [14] ~ [17]、ホッピング [18], [19]、銃を発射するタスク [20]、歩行 [21], [22]

[†] 名古屋大学大学院工学研究科, 名古屋市
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan
a) E-mail: s.togo@nuem.nagoya-u.ac.jp

などがある。

ではここで、コップの水をこぼさずに歩行するタスクでは何が性能変数となるだろうか。歩行中の上肢、体幹の動きは等速運動ではないので、コップの液体には重力だけでなく、加速度による慣性力が働く。よって、コップの中の液面は重力と慣性力の合力と直交する。このとき加速度が大きくても加速度の変化(ジャーク)が小さければ液面の揺れが抑えられて、コップの水はこぼれにくいと予想される。また同時に水平面からのコップの角度を一定に保つことも重要となるだろう。なぜなら手先のジャークが小さくてもコップの角度が一定でないならば水はこぼれてしまう。以上より、コップの水をこぼさずに歩行するというタスクを達成するためには、手先のジャークを小さくすることと水平面からのコップの角度を一定に保つことが重要であると考えられる。そこで本研究では性能変数として手先のジャークとコップの角度を解析する。

本研究では、コップの水をこぼさずに歩行するために、上記の性能変数が協調して制御されているのかを明らかにしたい。そのために、水が入っているコップを持って歩いた場合(水ありの場合)と水が入っていないコップを持って歩いた場合(水なしの場合)の計測実験を行った。最初に、“手先のジャークを小さくしている”ということと、“コップの角度を一定に保っている”ということを確認する。次に手先のジャークとコップの角度のタスク内の分散を調べる。性能変数に関する次の二つの仮説を UCM 解析を用いて検証する。一つは“手先のジャークを小さくするために各関節を協調させている”であり、もう一つは“コップの角度を一定に保つために各関節を協調させている”である。それぞれの仮説が正しいとすれば、結果は次のようになることが予想される。“水ありの場合に、手先のジャークに関する UCM に沿った分散成分 (V_{UCM}^{jerk}) は、直交する分散成分 (V_{ORT}^{jerk}) よりも大きい値をとる”。“水ありの場合に、水平面からのコップの角度に関する UCM に沿った分散成分 (V_{UCM}^{angle}) は、直交する分散成分 (V_{ORT}^{angle}) よりも大きい値をとる”。

2. 実験方法

2.1 被験者

被験者は健康な成人男性 6 名であり、全員が右利きであった。年齢は 22 歳から 26 歳(平均 23.3 歳)であり、身長は 160 [cm] から 176 [cm] (平均 172.7 [cm]) であり、体重は 60 [kg] から 64 [kg] (平均 61.2 [kg])

であった。本実験は名古屋大学倫理審査委員会の承認を受け、行われた。また実験前にすべての被験者は実験手順の説明を受け、書面にて同意した。

2.2 タスク

被験者は 0.56 [m/s] の速度でベルトが回転するトレッドミル (PW22, 日立情報通信エンジニアリング製) 上を水が入っているコップと水が入っていないコップを右手で保持し、それぞれ 5 分間歩行を行った。水が入っているコップは、表面までなみなみと水を注ぎ、タスクが十分に高い難易度となるようにした。水が入っていないコップは水が入っているコップと同様の重さになるように小石を入れて調節し、口の部分はテープで蓋をした。被験者間での歩幅と歩行周期のばらつきを抑えるため、1.4 [Hz] のタイミングでメトロノームの音によって合図を与えた。結果がタスクの順番に依存しないことを確認するために、水が入っているコップから始めるグループ(グループ 1)と水が入っていないコップから始めるグループ(グループ 2)にそれぞれ 3 人ずつ被験者を割り振った。タスク間に休憩はとらず、連続してタスクを行った。また、被験者は実験前にトレッドミル上での歩行に慣れるために歩行練習を 5 分間行った。被験者は両タスクにおいて、メトロノーム音に合わせて歩行すること、腕が矢状面に平行とすることを指示された。また水が入っているコップを持った歩行の場合では、コップの水をこぼさないように歩行することを指示された。

2.3 実験装置

身体各部位の位置データを取得するために三次元位置計測システム (OPTOTRAK CERTUS, Northern Digital Inc. 製) を用いた (サンプリング周波数 100 [Hz])。直径 7 [mm] の赤外線マーカーを図 1 に示

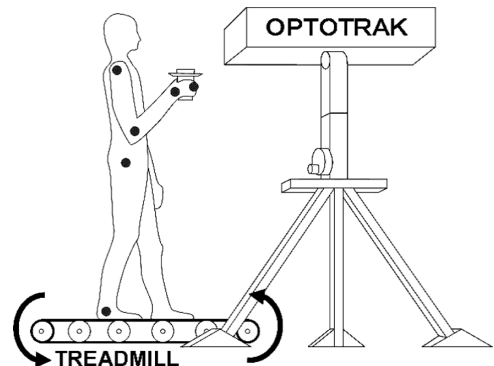


図 1 実験の様子

Fig. 1 Condition of experiment.

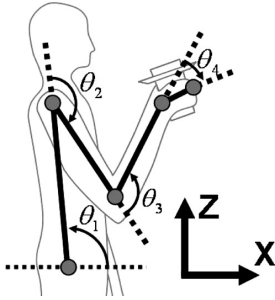


図 2 座標と関節角度の定義
Fig. 2 Coordinates of workspace and joint angle.

すように 6 箇所取り付け付けた．取り付け付けた箇所はそれぞれ踝，股関節の回転中心，肩の回転中心，肘の回転中心，手首の回転中心，中指の付け根とした．

2.4 データ解析

取得した位置データにはカットオフ周波数 10 [Hz]，二次のバターズ低域フィルタをかけた．図 2 に示すように各関節角度を定義した．身体各部位の位置のデータを 3 回微分することによって，身体各部位のジャークを求めた．微分するたびにカットオフ周波数 10 [Hz]，二次のバターズ低域フィルタをかけた．同様に関節角度も 3 回微分し，関節角ジャークを求めた．右踝の進行方向の速度が -0.45 [m/s] を超えた時間を歩行周期のはじめとし，すべての位置データを歩行周期で切り出し，各条件に対して約 200 周期分のデータを得た．すべての歩行周期のデータを三次スプライン補間により 100 点で正規化し，以下では 1 周期を 100 [%] で表記する．また着地時において，踝の加速度が最小となることから，この時刻を着地時刻と定義した．

2.5 UCM 解析

2.5.1 手先ジャークに関する UCM 解析

あるトライアルの時刻 t [%] における進行方向の手先位置 x_t と各関節角度の組 $\theta_t = [\theta_{1t}, \theta_{2t}, \theta_{3t}, \theta_{4t}]^T$ の関係はキネマティクスの式 $g(\theta)$ を用いると以下のように書ける．

$$x_t = g(\theta_t) \tag{1}$$

ここで式 (1) をトライアル間の平均 \bar{x}_t 周りで線形近似すると以下の式のようになる．

$$x_t - \bar{x}_t = J \cdot (\theta_t - \bar{\theta}_t) \tag{2}$$

ここで $J = \partial g(\bar{\theta}_t) / \partial \theta_t$ であり， $\bar{\theta}_t$ は時刻 t における関節角度の組のトライアル間の平均である．式 (2)

を 3 回微分することによって手先のジャーク d^3x_t/dt^3 と各関節角度，角速度，角加速度，角ジャークの組 $\Theta_t = [\theta_t, d\theta_t/dt, d^2\theta_t/dt^2, d^3\theta_t/dt^3]^T$ の関係は以下のようになる．

$$\begin{aligned} \frac{d^3x_t}{dt^3} - \frac{d^3\bar{x}_t}{dt^3} &= \left[\frac{d^3J}{dt^3}, 3 \frac{d^2J}{dt^2}, 3 \frac{dJ}{dt}, J \right] \cdot (\Theta_t - \bar{\Theta}_t) \end{aligned} \tag{3}$$

このとき，UCM はヤコビアン J を微分した組の零空間によって定義される．時刻 t の零空間の基底ベクトル $\epsilon_{i,t}$ は以下の式を解くことによって得られる．

$$0 = \left[\frac{d^3J}{dt^3}, 3 \frac{d^2J}{dt^2}, 3 \frac{dJ}{dt}, J \right] \cdot \epsilon_{i,t} \tag{4}$$

関節の状態の組の次元を n ($n = 16$)，性能変数の次元を d ($d = 1$) とすると，零空間の基底ベクトルは $n - d$ 個存在するので，零空間は $n - d$ 次元となる．よってあるトライアルでの UCM 空間に平行な Θ_t の $\bar{\Theta}_t$ からのばらつきは以下の式のように計算できる．

$$\Theta_{\parallel,t} = \sum_{i=1}^{n-d} \epsilon_{i,t}^T \cdot (\Theta_t - \bar{\Theta}_t) \cdot \epsilon_{i,t} \tag{5}$$

UCM 空間に垂直な成分は以下のようになる．

$$\Theta_{\perp,t} = (\Theta_t - \bar{\Theta}_t) - \Theta_{\parallel,t} \tag{6}$$

自由度で正規化をかけた各分散の量は以下のようになる．

$$\sigma_{jerk\parallel,t}^2 = \frac{\Theta_{\parallel,t}^2}{n - d} \tag{7}$$

$$\sigma_{jerk\perp,t}^2 = \frac{\Theta_{\perp,t}^2}{d} \tag{8}$$

本研究で求める手先ジャークに関する各分散成分は歩行の 1 周期の各時刻 (1 ~ 100 [%]) の和をとって以下のように定義する．

$$V_{UCM}^{jerk} = \sum \sigma_{jerk\parallel,t} \tag{9}$$

$$V_{ORT}^{jerk} = \sum \sigma_{jerk\perp,t} \tag{10}$$

上記の計算によって，あるトライアルでの関節角度，角速度，角加速度，角ジャークの組のばらつきを手先ジャークに影響を与えないもの (V_{UCM}^{jerk}) と直接影響を与えるもの (V_{ORT}^{jerk}) に分割することができる．

2.5.2 コップの角度に関する UCM 解析

コップ (手先) の水平面からの角度 θ_{hor} を図 2 に示

した各関節角度を用いて表すと以下の式ようになる .

$$\theta_{hor} = [1, 1, 1, 1] \cdot [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T \quad (11)$$

2.5.1 で示した方法と同様に零空間を計算し, 各関節角度の組の分散を UCM 空間に平行なものと垂直なものに分割し, 式 (9), (10) に相当するものを以下のように定義する .

$$V_{UCM}^{angle} = \sum \sigma_{angle\parallel,t} \quad (12)$$

$$V_{ORT}^{angle} = \sum \sigma_{angle\perp,t} \quad (13)$$

ここで V_{UCM}^{angle} はあるトライアルにおけるコップの角度に影響を与えない関節角の組のばらつきであり, V_{ORT}^{angle} はコップの角度に影響を与える関節角の組のばらつきである .

2.6 統計解析

以下に挙げる六つのことを確かめるために対応のある t 検定 (2 標本の両側検定) を用いた (有意水準 $\alpha = 0.05$, 自由度 $n = 185 \sim 208$).

(1) 各被験者において水ありの場合と水なしの場合で手先ジャークに有意な差があるかどうか .

(2) 各被験者の関節角ジャークに水ありの場合と水なしの場合で有意な差があるかどうか .

(3) 水ありの場合に, 各被験者の手先ジャークに関する UCM 解析により得られた分散成分に UCM 成分と ORT 成分で有意な差があるかどうか .

(4) 各被験者の手先ジャークに関する UCM 解析により得られた分散成分に水ありの場合と水なしの場合で有意な差があるかどうか .

(5) 水ありの場合に, 各被験者のコップ角度に関する UCM 解析により得られた分散成分に UCM 成分と ORT 成分で有意な差があるかどうか .

(6) 各被験者のコップ角度に関する UCM 解析により得られた分散成分に水ありの場合と水なしの場合で有意な差があるかどうか .

また, 各被験者の身体各部位のジャーク二乗和に水ありの場合と水なしの場合で有意な差があるかどうかを確かめるために, 水の有無と身体各部位を要因とする二元配置分散分析を用いた . Post-hoc テストには Turkey-Kramer 法を用いた (有意水準 $\alpha = 0.05$).

また上記のことが, 母集団を人間一般とした際にも有意性を示すことを確かめるために, 各被験者のトライアル間の平均を代表値とした対応のある t 検定 (自由度 $n = 5$) と, 二元配置分散分析を行った .

3. 結 果

3.1 身体各部位のジャーク

ここでは進行方向のデータのみを掲載する . 図 3 に被験者 A の身体各部位のジャークの二乗和を示す . 横軸が左側から手先, 肘, 肩, 股関節となっており縦軸は各身体部位のジャークの 2 乗を歩行の 1 周期にわたって足し合わせたものである . 黒が水ありの場合で白が水なしの場合である .

水ありの場合のほうが手先のジャークが小さくなっていることが分かった ($P < 0.05$). また, 二元配置分散分析では水の有無, 身体各部位の主効果がすべての被験者で有意であり ($P < 0.05$), 交互作用は被験者 C を除いて ($P = 0.322$) 有意であった ($P < 0.05$). 各被験者のトライアル間の平均を代表値とした, 全被験者での比較でも, 水の有無, 身体各部位の主効果がすべての被験者で有意であった ($P < 0.05$). よって, 手先以外の部分もすべてジャークが小さくなっており, 手先に向かうにつれて段々とジャークが小さくなっていることが分かった .

また図 4 に被験者 A の手先ジャークの波形の加算平均を示す . 横軸が歩行の 1 周期を 100% で正規化したもので, 縦軸は手先のジャークの値である . 薄い点線が水ありの場合で濃い実線が水なしの場合である . また縦の点線が着地の瞬間の平均である . ジャークのピーク値が特に減少していることが分かった .

図 5 にすべての被験者の手先ジャークの二乗和を示す . 縦軸が手先のジャークの二乗和であり, 被験者 A, B, C がグループ 1, 被験者 D, E, F がグループ 2 である . 黒が水ありの場合で白が水なしの場合である .

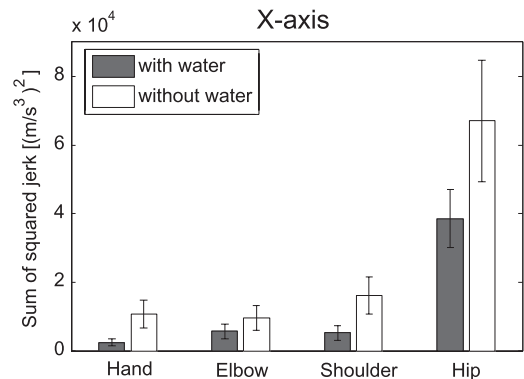


図 3 被験者 A の身体各部位のジャーク二乗和
Fig.3 Sum of squared jerk of each body part of subject A.

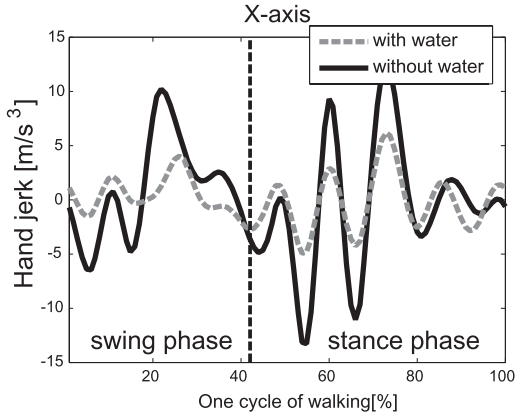


図 4 被験者 A の手先ジャーク波形の平均
Fig. 4 Mean of hand jerk waveform of subject A.

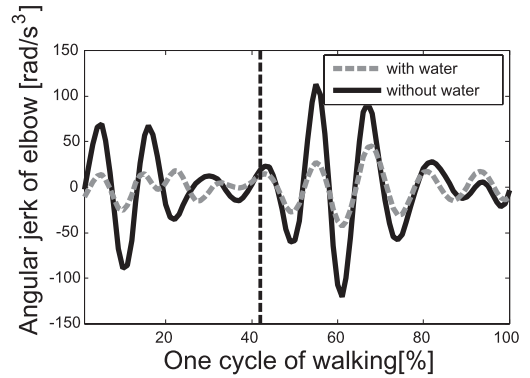


図 6 被験者 A の肘関節角ジャークの波形の平均
Fig. 6 Mean waveform of elbow joint angular jerk of subject A.

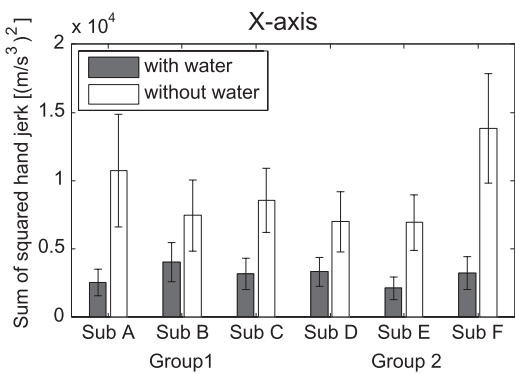


図 5 すべての被験者の手先ジャークの二乗和
Fig. 5 Sum of squared hand jerk of all subjects.

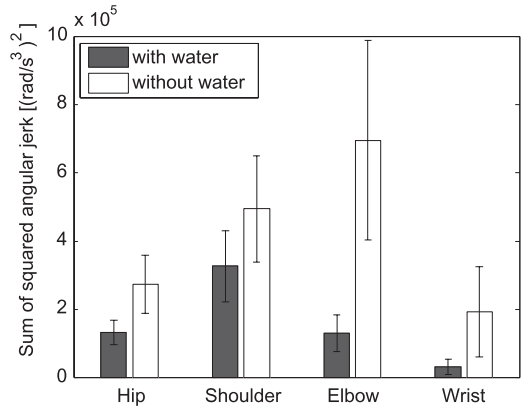


図 7 被験者 A の各部位の関節角ジャーク二乗和
Fig. 7 Sum of squared joint angular jerk of each body part of subject A.

すべての被験者においてグループの差によらず、水ありの方が手先のジャークが小さくなっていることが分かった ($P < 0.05$)。また、各被験者のトライアル間の平均を代表値とした、全被験者での比較でも同様に、水ありの方が手先のジャークが小さくなっていることが分かった ($P < 0.05$)。なお、上下方向に関しても詳細な図は省略するが、同様に水がある場合にジャークは減少した。

図 6 に被験者 A の肘関節の角ジャークの加算平均の波形を示す。横軸が歩行の 1 周期を 100% で正規化したもので、縦軸が角ジャークの値である。これも手先ジャークの波形 (図 4) と同様にピーク値が減少していることが分かった。

他の部位に関しては図 7 に被験者 A の各関節角ジャークの二乗和を示した。横軸が右側から手首角度 (θ_4)、肘角度 (θ_3)、肩角度 (θ_2)、腰角度 (θ_1) であ

り、縦軸は角ジャークの歩行 1 周期分の二乗和である。すべての箇所でも水ありの場合の角ジャークが小さくなっているということが分かった ($P < 0.05$)。また、各被験者のトライアル間の平均を代表値とした、全被験者での比較でも手首角度を除き、水ありの方が角ジャークが小さくなっていることが分かった ($P < 0.05$)。

3.2 コップの角度

図 8 にタスク内のコップ角度の分散を示す。縦軸が水平面からのコップ角度の分散である。黒色が水ありの場合で、白色が水なしの場合である。すべての被験者においてグループの差によらず水ありの場合にコップの角度の分散が小さくなっており、コップの角度を一定に保っていたことが分かった。

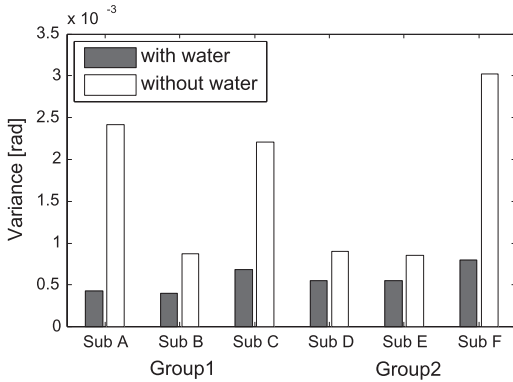


図 8 全被験者のタスク内のコップ角度の分散
Fig. 8 Variance of cup angle in task of all subjects.

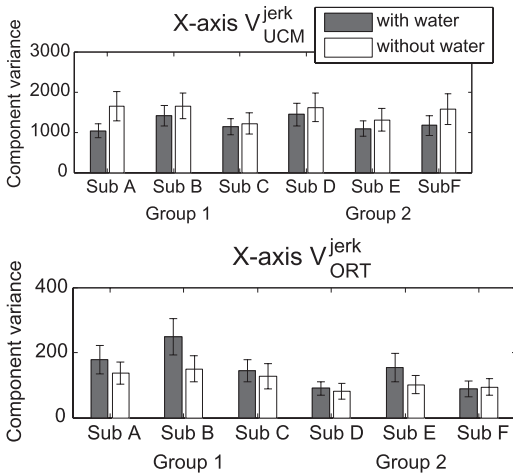


図 9 全被験者の手先ジャークに関する各分散成分
Fig. 9 Component variance of hand jerk of all subjects.

3.3 手先のジャークに関する各分散成分

図 9 にすべての被験者の手先ジャークに関する UCM 解析の結果を示す．縦軸が各分散成分の歩行 1 周期分の和をとったもののタスク内の平均と分散である．上段が UCM 成分 (V_{UCM}^{jerk})，下段が ORT 成分 (V_{ORT}^{jerk}) を示す．黒色が水ありの場合，白色が水なしの場合である．

すべての被験者において UCM 成分は ORT 成分よりも大きい値であった ($P < 0.05$)．また，すべての被験者において水ありの場合に V_{UCM}^{jerk} が減少していることが分かった ($P < 0.05$)．また V_{ORT}^{jerk} については被験者 F を除いて ($P = 0.374$) 有意差あり ($P < 0.05$) という結果となった．これらの結果はグループの差によらず同様の傾向を示すことが分かった．

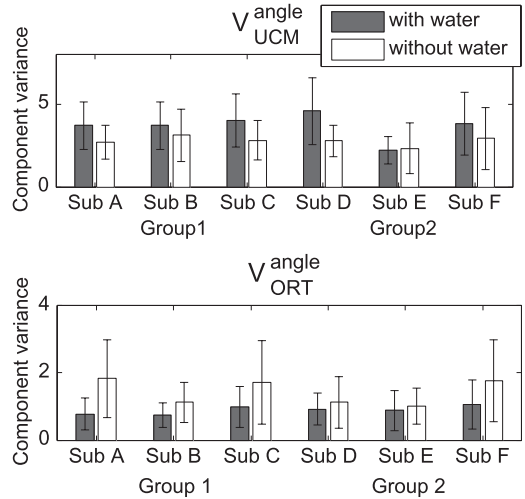


図 10 全被験者のコップ角度に関する各分散成分
Fig. 10 Component variance of cup angle of all subjects.

各被験者のトライアル間の平均を代表値とした，全被験者での比較でも，UCM 成分は ORT 成分よりも大きい値であった ($P < 0.05$)．また，水ありの場合に V_{UCM}^{jerk} は減少した ($P < 0.05$) が， V_{ORT}^{jerk} は有意な差が認められなかった ($P = 0.052$)．

なお上下方向に関しても同様の傾向を示した．

3.4 コップ角度に関する各分散成分

図 10 にすべての被験者のコップ角度に関する UCM 解析の結果を示す．縦軸が各分散成分の歩行 1 周期分の和をとったもののタスク内の平均と分散である．

すべての被験者において UCM 成分は ORT 成分よりも大きい値であった ($P < 0.05$)．また， V_{UCM}^{angle} については被験者 E を除いて ($P = 0.305$)，水ありの場合に有意に増加している ($P < 0.05$) という結果であり， V_{ORT}^{angle} についてはすべての被験者で有意に減少している ($P < 0.05$) という結果であった．これらの結果はグループの差によらず同様の傾向を示すことが分かった．

各被験者のトライアル間の平均を代表値とした，全被験者での比較でも，UCM 成分は ORT 成分よりも大きい値であった ($P < 0.05$)．また，水ありの場合に V_{UCM}^{angle} は増加し， V_{ORT}^{angle} は減少した ($P < 0.05$)．

また図 11 に被験者 A のコップ角度の各分散成分の時系列を示す．横軸が歩行の 1 周期を 100% で正規化したもので，縦軸がトライアル間の分散成分の平均と標準偏差である．上段が UCM 成分であり下段が

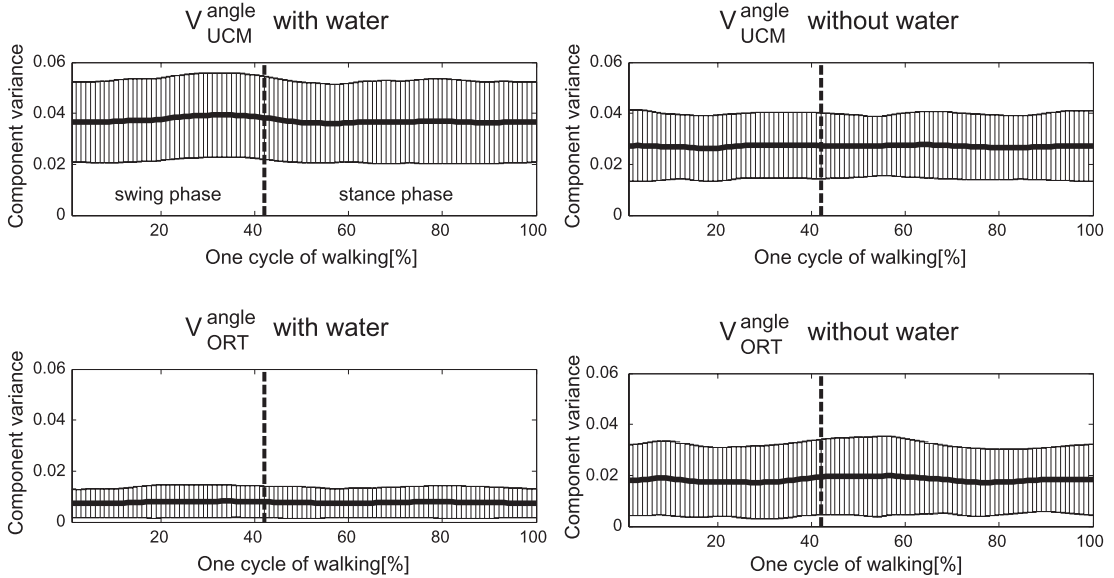


図 11 被験者 A のコップ角度に関する各分散成分の時系列
Fig. 11 Time series of component variance of cup angle of subject A.

ORT 成分，左側が水ありの場合で右側が水なしの場合である．図 4 に示したジャークのピークに対応して分散成分が変化しておらず，タスク全体で分散成分が変化していることが分かった．

4. 考 察

本研究では，コップの水をこぼさずに歩行するために人間はどのような方策をとっているのかを調べた．はじめに手先のジャークが小さくなっていることと，コップの角度を一定に保っていることを確認した．また以下の二つの仮説を検証した．“手先のジャークを小さくするために各関節を協調させている”．“コップの角度を一定に保つために各関節を協調させている”．水ありの場合と水なしの場合を比較する実験から UCM 解析を行い，これらの仮説と対応する以下のような結果を得た．“水ありの場合に V_{UCM}^{jerk} は， V_{ORT}^{jerk} よりも顕著に大きい”という仮説を支持する結果を得た．また，“水ありの場合に V_{UCM}^{angle} は， V_{ORT}^{angle} よりも大きい”という仮説を支持する結果を得た．以下にそれぞれの結果について詳しく考察する．

図 3，図 5 より，水ありの場合で手先のジャークが小さくなっており，同様に図 7 より，各関節角ジャークも小さくなっていることが分かった．また図 8 より，コップの角度のタスク内の分散も小さくなっていることが分かった．更に図 3 より，腰から手先に向かうに

つれて段々とジャークが小さくなっていることが分かり，これは足先から手先に向かうにつれて身体の自由度を用いてジャークを小さくしている可能性が考えられる．図 4 を見るとジャークのピークの部分が特に大きく抑制されていることが分かった．ここで振動の抑制はこのピークの部分に絞って行われているのかが疑問として挙げられる．図 11 から各分散成分は特定の時間でピークをもつような形をしていないことが分かる．また人間の視覚フィードバックには一般的に 200 ~ 300 [ms] の大きな時間遅れがある [23], [24] ので，リアルタイムで振動を抑制しているとは考えづらい．以上のことから振動の抑制はジャークのピークの部分に絞って行われているのではなく，タスク全体で行われているということが示唆される．

コップの角度を一定に保つために各関節を協調させているという仮説については，図 10 より，水ありの場合に V_{UCM}^{angle} は， V_{ORT}^{angle} よりも大きいことが分かった．またこのとき， V_{UCM}^{angle} は増加し， V_{ORT}^{angle} は減少した．つまり水ありの場合にコップの角度に影響を与えない分散成分 (V_{UCM}^{angle}) が，直接影響を与える分散成分 (V_{ORT}^{angle}) よりも大きかったことから，コップの角度が性能変数として協調動作によって制御されていると考えられる．また，水ありの場合に V_{UCM}^{angle} は増加し， V_{ORT}^{angle} は減少したことから，コップの角度に直接影響を及ぼす分散を小さくするような協調が，より

強く働いてコップから水がこぼれないようにしたと推測される。また図 8 に示すよう、コップの角度の分散が水ありの場合で減少したことから、コップの角度を一定に保つために各関節を協調させていることが示唆される。

手先のジャークを小さくするために各関節を協調させているという仮説については、図 9 より、水ありの場合に V_{UCM}^{jerk} は、 V_{ORT}^{jerk} よりも顕著に高い値であるので、各関節が協調して性能変数であるジャークを制御していることが考えられる。また図 4 の結果に示すよう、手先ジャークが水ありの場合で減少したことから、手先ジャークを小さくするために各関節を協調させていることが示唆される。しかしながら水ありの場合に V_{UCM}^{jerk} は減少し、有意差は認められなかったが、 V_{ORT}^{jerk} は増加する傾向にある。原因としては、コップの角度を一定に保つための協調動作によって、ジャークの協調動作が干渉を受けたという可能性が考えられる。水なしの場合に比べて水ありの場合はコップの角度という性能変数が拘束条件として付加されたとみなすことができるので、ジャークを性能変数とする制御が干渉を受けた可能性が考えられる。つまり V_{UCM}^{angle} を増加させ、 V_{ORT}^{angle} を減少させるコップの角度を一定に保つ協調動作が、ジャークを小さくする協調動作に干渉し、 V_{UCM}^{jerk} が減少し、 V_{ORT}^{jerk} が増加したのかも示れない。

ジャークよりも高階の微分については、ジャークを小さくすることで、高階微分も小さくすることができると思われる。本研究で用いたコップの液面のモデルと UCM 解析の結果より、人間はジャークを制御していると考えられる。人間がジャークを知覚できるのかという疑問は残るが、それは本研究の範疇を超えるので今後の課題としたい。

以上の結果から人間はコップの水をこぼさずに歩行するために、各関節を協調させて手先のジャークを小さくし、水平面からのコップの角度を一定に保っているということが示唆された。

5. む す び

本研究ではコップの水をこぼさずに歩行するという動作について、人間がどのような方策をとっているのかを調べてきた。身体各部位のジャーク、関節角ジャークを小さくし、コップの角度を一定に保つことが水をこぼさないための条件とし、水が入っているコップを持って歩く場合と水が入っていないコップを持って歩

く場合を比較する実験により確認した。そしてこの条件を達成するために各関節の協調を利用しているという仮説を立てた。手先のジャークに関係する関節角度、角速度、角加速度、角ジャークの分散と、コップの角度に関係する関節角度の分散を UCM 解析を用いて二つの直交する成分（性能変数に影響を与えない UCM 成分と直接影響を与える ORT 成分）に分割し、協調度を定量的に評価した。結果として水が入っているコップの場合ではどちらの分散成分も UCM 成分が ORT 成分よりも顕著に大きいという関係であったので各関節を協調させて手先のジャークが小さくなるように制御し、コップの角度を一定に保つよう制御していることが示唆された。また歩行周期の全体にわたって分散成分の平均と標準偏差は同程度であったことから、ジャークのピークに絞って振動を抑制するような制御は行っておらず、タスク全体で振動を抑制していることが示唆された。

本研究では定常歩行における振動抑制の方策を調べてきたので、歩行中に外乱を加えたときの過渡応答を調べることにより、更に詳細な振動抑制の制御メカニズムにアプローチしていくことが今後の課題として考えられる。

謝辞 本研究を進めるにあたり貴重な助言を頂いた、名古屋大学田地宏一准教授に感謝致します。また、本研究は科学研究費補助金基盤型研究 (B) No.21300092 及び若手研究 (B) No.20780165 により行われた。また、本研究の一部は堀情報科学振興財団一般研究助成の支援により行われた。

文 献

- [1] N.A. Bernstein (著), 工藤和俊 (訳), 佐々木正人 (監訳), デクステリティ 巧みさとその発達, 金子書房, 東京, 2003.
- [2] J.P. Scholz and G. Schöner, "The uncontrolled manifold concept: Identifying control variables for a functional task," *Exp. Brain Res.*, vol.126, pp.289–306, 1999.
- [3] M.L. Latash, J.P. Scholz, and G. Schöner, "Motor control strategies revealed in the structure of motor variability," *Exerc. Sport. Sci. Rev.*, vol.30, pp.26–31, 2002.
- [4] V. Krishnamoorthy, M.L. Latash, J.P. Scholz, and V.M. Zatsiorsky, "Muscle synergies during shifts of the center of pressure by standing persons," *Exp. Brain Res.*, vol.152, pp.281–292, 2003.
- [5] A. Danna-dos-Santos, K. Slomka, V.M. Zatsiorsky, and M.L. Latash, "Muscle modes and synergies during voluntary body sway," *Exp. Brain Res.*, vol.179,

- pp.533-550, 2007.
- [6] J.P. Scholz, G. Schöner, W.L. Hsu, J.J. Jeka, F. Horak, and V. Martin, "Motor equivalent control of the center of mass in response to support surface perturbations," *Exp. Brain Res.*, vol.180, pp.163-179, 2007.
- [7] T. Robert, V.M. Zatsiorsky, and M.L. Latash, "Multi-muscle synergies in an unusual postural task: Quick shear force production," *Exp. Brain Res.*, vol.187, pp.237-253, 2008.
- [8] J. Wu, S. McKay, and R. Angulo-Barroso, "Center of mass control and multi-segment coordination in children during quiet stance," *Exp. Brain Res.*, vol.196, pp.329-339, 2009.
- [9] N. Kang, M. Shinohara, V.M. Zatsiorsky, and M.L. Latash, "Learning multi-finger synergies: An uncontrolled manifold analysis," *Exp. Brain Res.*, vol.157, pp.336-350, 2004.
- [10] M.L. Latash, J.K. Shim, and V.M. Zatsiorsky, "Is there a timing synergy during multi-finger production of quick force pulses?," *Exp. Brain Res.*, vol.159, pp.65-71, 2004.
- [11] W. Zhang, R.L. Sainburg, V.M. Zatsiorsky, and M.L. Latash, "Hand dominance multi-finger synergies," *Neuroscience Letters*, vol.409, pp.200-204, 2006.
- [12] H.B. Olafsdottir, S.W. Kim, V.M. Zatsiorsky, and M.L. Latash, "Anticipatory synergy adjustments in preparation to self-triggered perturbations in elderly individuals," *J. Appl. Biomech.*, vol.24, pp.175-179, 2008.
- [13] R. Ranganathan and K.M. Newell, "Motor synergies: Feedback and error compensation within and between trials," *Exp. Brain Res.*, vol.186, pp.561-570, 2008.
- [14] Y. Tseng, J.P. Scholz, and G. Schöner, "Goal-equivalent joint coordination in pointing: Affect of vision and arm dominance," *Motor Control*, vol.6, pp.183-204, 2002.
- [15] D. Domkin, J. Laczko, S. Jaric, H. Johansson, and M.L. Latash, "Structure of joint variability in bimanual pointing tasks," *Exp. Brain Res.*, vol.143, pp.11-23, 2002.
- [16] D. Domkin, J. Laczko, M. Djupsjöbacka, S. Jaric, and M.L. Latash, "Joint angle variability in 3D bimanual pointing: Uncontrolled manifold analysis," *Exp. Brain Res.*, vol.163, pp.44-57, 2005.
- [17] J.-F. Yang, J.P. Scholz, and M.L. Latash, "The role of kinematic redundancy in adaptation of reaching," *Exp. Brain Res.*, vol.176, pp.54-69, 2007.
- [18] A.G. Auyang, J.T. Yen, and Y.-H. Chang, "Neuromechanical stabilization of leg length and orientation through interjoint compensation during human hopping," *Exp. Brain Res.*, vol.192, pp.253-264, 2009.
- [19] J.T. Yen, A.G. Auyang, and Y.-H. Chang, "Joint-level kinetic redundancy is exploited to control limb level forces during human hopping," *Exp. Brain Res.*, vol.196, pp.439-451, 2009.
- [20] J.P. Scholz, G. Schöner, and M.L. Latash, "Identifying the control structure of multijoint coordination during pistol shooting," *Exp. Brain Res.*, vol.135, pp.382-404, 2000.
- [21] D.P. Black, B.A. Smith, J. Wu, and B.D. Ulrich, "Uncontrolled manifold analysis of segmental angle variability during walking: Preadolescents with and without down syndrome," *Exp. Brain Res.*, vol.183, pp.511-521, 2007.
- [22] T. Robert, B.C. Bennett, S.D. Russell, C.A. Zirker, and M.F. Abel, "Angular momentum synergies during walking," *Exp. Brain Res.*, vol.197, pp.185-197, 2009.
- [23] M.A. Khan, G. Lawrence, A. Fourkas, I.M. Franks, D. Elliott, and S. Pembroke, "Online versus offline processing of visual feedback in the control of movement amplitude," *Acta Psychol.*, vol.113, pp.83-97, 2003.
- [24] Carlton LG, "Processing visual feedback information for movement control," *J. Exp. Psychol.*, vol.7, pp.1019-1030, 1981. (平成 22 年 8 月 4 日受付)



東郷 俊太

平 21 名大・工卒・同年同大学院工学
研究科・博士前期課程入学。現在に至る。
身体運動の解析の研究に従事。日本神経回
路学会会員。



香川 高弘 (正員)

平 18 豊橋技科大・工・博士後期課程単
位取得退学。同年慶大・理工・生命情報学
科助手。同大月が瀬リハビリテーションセン
ターに出向。平 19 名大・工・機械助教。
博士(工学)。現在に至る。身体運動の解
析とリハビリテーション工学の研究に従事。
計測自動制御学会, 電気学会各会員。



宇野 洋二 (正員)

昭 63 大阪大学大学院基礎工学研究科博
士課程了。工博。同年東大・工・計数助手。
平 3 同講師。平 4 ATR 人間情報通信研究
所主任研究員。平 8 豊橋技科大情報工学系
教授。平 18 名大・工・機械教授。現在に
至る。生体の運動機能の研究に従事。日本
神経回路学会, 計測自動制御学会各会員。