

## 歩行中の手先振動を抑制する関節間協調に対する視覚情報の働き

東郷 俊太<sup>†</sup> 香川 高弘<sup>†</sup> 宇野 洋二<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 名古屋大学大学院工学研究科  
 〒 466-8603 愛知県名古屋市千種区不老町  
 E-mail: s.togo@nuem.nagoya-u.ac.jp

**あらまし** コップの水をこぼさずに運ぶ動作に対して、視覚情報はどのような働きをするのかを調べた。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条件とし、歩行中に視覚情報を遮断した場合、それらの変数がどのように変化するかを調べた。水が入ったコップを持って歩行している際に、手元の視覚情報を途中から遮断し続ける場合と、遮断しない場合を比較する計測実験を行った。その結果、ジャークに関してはほとんど影響が無く、コップの角度がゆっくりとドリフトしていった。また、UCM解析によりコップの角度に関する関節間協調の低下が示された。これらの結果から、手先振動を抑制する際に視覚情報は、コップの角度のキャリブレーションを行うのに使用されていることが示唆された。また、関節間協調の維持には性能変数の知覚が重要であることも示唆された。

**キーワード** 視覚情報、関節間協調、シナジー、ジャーク、UCM解析

## A role of visual information for joint coordination to dampen hand vibration during human walking

Shunta TOGO<sup>†</sup>, Takahiro KAGAWA<sup>†</sup>, and Yoji UNO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University,  
 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan  
 E-mail: s.togo@nuem.nagoya-u.ac.jp

**Abstract** We investigate a role of visual information for carrying a cup filled with water without spilling. We assume that reducing hand-jerk and keeping cup-angle constant are required to achieve the task. Subjects were asked to walk holding a cup with water, and their visual information was or was not blocked. As a result, hand-jerk was not affected by visual blocking, but cup-angle was slowly drifted. According to UCM analysis, the index of cup-angle synergy was dropped by visual blocking. These results suggest that the human used visual information to calibrate cup-angle while dampening hand vibration during walking. Moreover, it is suggested that perceiving some performance variables is important to keep joint coordination.

**Key words** Visual information, Joint coordination, Synergy, Jerk, UCM analysis

### 1. はじめに

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たくさんある。その働きや制御方策を知るとは人間の脳や中枢神経系の働きを理解するうえで有益である。我々はこれまでに、巧みな運動のひとつとして、“コップの水をこぼさずに運ぶ”動作の解析を行ってきた[1]。そして、この動作を達成するためには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重要であり、人間が協調動作によってそれを達成していることを示してきた。しかしこの協調動作において、具体的にどの

ような情報を使って、どのように制御しているのかについては言及してこなかった。

そこで本研究では、コップの水をこぼさずに運ぶ、すなわち歩行中の手先の振動を抑制するという動作における視覚情報の働きを明らかにすることを目的とする。最近、我々はコップの水をこぼさずに運んでいる途中に、視覚情報を短い時間遮断する実験を行った[2]。その結果、振動を抑制するのに重要であると考えられる性能変数である、手先ジャーク、コップ角度共に視覚の有無によって変化は見られなかった。この結果から少なくともリアルタイムな視覚フィードバックは、振動抑制に用い

られていないことが示唆された。

では視覚情報はどのような働きを持つのだろうか。先行研究 [2] では視覚情報の遮断に際し、液晶シャッターゴーグルを用いた。この液晶シャッターゴーグルを用いて、長時間視覚を遮断しようとする、歩行自体が不安定となり、トレッドミル上での歩行は不可能となる。液晶シャッターゴーグルによる短時間の視覚情報の遮断では違いが見られなかったが、より長い時定数で作用する可能性も考えられる。そこで本研究では液晶シャッターゴーグルと同様の性質を持ち、かつ手元の視覚情報のみを遮断できる、液晶シャッタープレートを製作した。これにより、歩行を不安定化させることなく手元の視覚情報のみを任意に遮断することができる。本研究ではこの液晶シャッタープレートを用いて、長時間コップに関する視覚情報を遮断することによる影響について調べる。

また視覚を遮断することで協調動作がどのように変化するかを UCM 解析 [3], [4] を用いて明らかにする。UCM 解析は、あるタスクにおいて制御したい変数（性能変数）に関わる冗長性を持つ多要素（運動要素）の分散を 2 つの直交する成分に分割する。1 つは性能変数に影響を与えない分散成分（UCM 成分）であり、もう 1 つはそれに直交し、性能変数に直接影響を与える分散成分（ORT 成分）である。性能変数が運動要素の協調によって制御されているとすると、UCM 成分は ORT 成分よりも大きな値をとる。

ここで、視覚を遮断することで性能変数がどのように変化するかを考える。手先のジャーク、コップの角度と 2 つの性能変数は、それぞれどの感覚器官で知覚されるだろうか。手先のジャークに関しては、体性感覚による手先位置の知覚、手先の皮膚感覚情報によるコップのモーメントの知覚、液面の揺れの視覚情報が考えられる。一方コップ角度に関しては、ワールド座標との相対角度になるので、視覚情報による知覚か、足元からの運動学計算が考えられる。体性感覚の位置知覚には一般的に誤差が存在することが先行研究により知られている [5]。このことから少なくともコップ角度の知覚は視覚を遮断することにより困難となるので、協調動作に影響が出ると考えられる。手先ジャークに関してはヒトがジャークを知覚できるのかどうか定かではないが、ワールド座標との関係がそれほど重要ではないという点から知覚情報は必要がない可能性が考えられる。

以上より、歩行中の手先振動抑制における視覚情報の働きの 1 つは、コップ角度の知覚であるという仮説を立てる。この仮説が正しければ、視覚情報を長時間遮断することによってコップの角度が変化していき、協調度が低下することが考えられる。

## 2. 実験方法

### 2.1 被験者

被験者は健康な成人男性 4 名であり、全員が右利きであった。年齢は 22 歳から 24 歳（平均 22.8 歳）であり、身長は 167 [cm] から 176 [cm]（平均 173.3 [cm]）であり、体重は 60 [kg] から 65 [kg]（平均 62 [kg]）であった。

### 2.2 実験装置

身体各部位の位置データを取得するために 3 次元位置計測シ

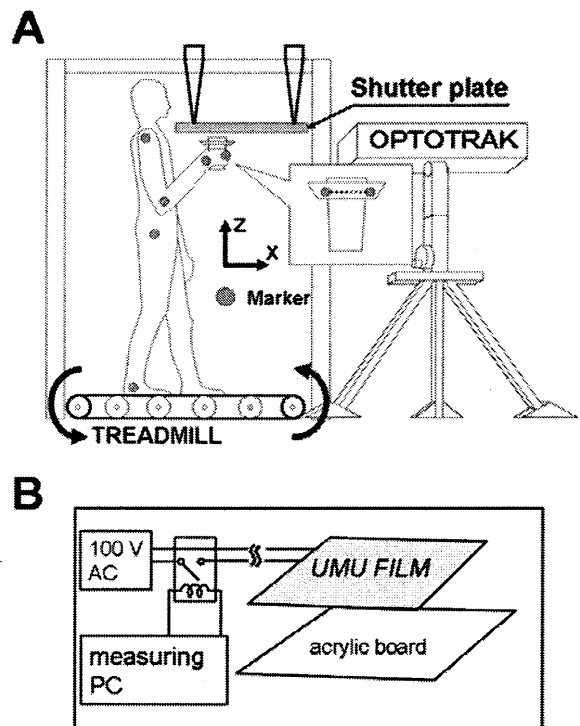


図 1 実験の概略図と使用した装置。A：被験者は右手で水が入ったコップを持ち、トレッドミル上を歩行した。各身体部位に取り付けたマーカの位置情報を三次元位置計測装置を用いて取得した。シャッタープレートは被験者の首の位置に来るように調節した。B：シャッタープレートの構成図。PC からリレー回路を制御することにより、ウムフィルムのシャッターの開閉を任意に制御することができる。

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] の赤外線マーカを図 1.A に示すようにどちらのタスクとも 8 箇所に取り付けた。取り付け箇所はそれぞれ踝、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、コップの側面とした。

前節で説明したように、液晶シャッターゴーグルは被験者の全ての視覚を遮断してしまうので、長時間視覚を遮断しようすると周辺視野の情報も得られないため、歩行が不安定になる。全ての視覚が遮断された状態でも歩行は可能であるが、前後左右方向に着地位置がばらつくので、トレッドミル上での歩行は非常に困難となる。そこで、全ての視覚情報を遮断するのではなく、コップを持っている手元のみ視覚情報を遮断するために、ウムフィルム（日本板硝子ウムプロダクツ株式会社製）を用いて液晶シャッタープレートを製作した（図 1.B）。ウムフィルムは通常時には曇りガラスようになっており、家庭用電源の電圧（AC100 [V]）をかけると液晶シャッターが開いて透明になる。そのサイズは縦 500 [mm]、横 600 [mm] である。また、ウムフィルムは薄いフィルムであるので、縦 500 [mm]、横 700 [mm]、厚さ 3 [mm] のアクリル板に固定した。家庭用電源電圧のオンオフを任意に制御するために、ウムフィルムと電源の間にリレー回路を取り付け、計測用 PC から任意に制御でき

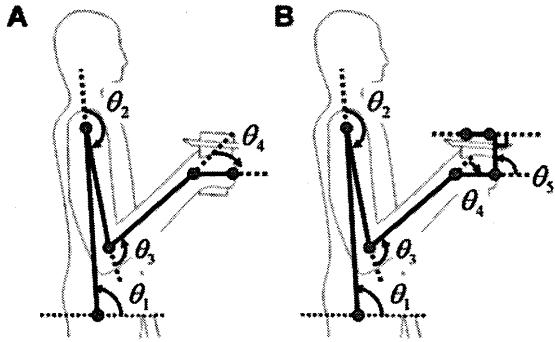


図2 2種類のUCM解析に対するそれぞれの関節角度の定義. A: 手先ジャークに関するUCM解析の関節角定義. B: コップ角度に関するUCM解析の関節角定義.

るようにした. この液晶シャッタープレートをトレッドミルを囲んでいるフレームに取り付けた(図1.A). 液晶シャッター透過時には手元の様子が見え, 遮断時には手元は見えなくなる. 遮断から透過には約1 [ms] かかり, 透過から遮断への立下りは約10 [ms] かかる.

### 2.3 タスク

被験者は右手でコップを保持し, 0.69 [m/s] (2.5 [km/h]) 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) 上を歩行した(図1.A). 液晶シャッタープレートは被験者の首の位置に来るように調節した. 歩幅と歩行周期のばらつきを抑えるために, 1.5 [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. また, 被験者はトレッドミル上での歩行に慣れるために, タスク開始前に5分間の歩行練習を行った. タスクは視覚情報の有無により次の二つを設定した.

- 視覚情報が常に得られる状態で12分間歩行を行う(WWタスク).
  - 計測開始から2分後に視覚情報を遮断し, そのまま10分間, 計12分間歩行を行う(WW Shutタスク).
- 両タスクとも被験者は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なること, コップの水をこぼさないようにすることが指示された. 被験者が疲労を感じた場合にはタスク間に休憩を取ることとした.

### 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], 2次のバターワースローパスフィルタをかけた. 位置データの3階微分をとり, ジャークのデータを求めた. 微分するたびにカットオフ周波数10 [Hz], 2次のバターワースローパスフィルタをかけた. 踝の進行方向の速度が-0.6 [m/s] を超えた時間を歩行周期のはじめとし, UCM解析に用いるすべてのデータを歩行周期で切り出した. 切り出したデータは3次スプライン補間によって100点で正規化された. 各データから歩行1周期分のジャーク二乗和, 各協調度を求め, 1分毎に平均をとり, WWタスクとWW Shutタスクを比較した.

## 2.5 UCM解析

### 2.5.1 手先ジャークに関するUCM解析

手先ジャークの各分散成分の計算には図2.Aに示すような関節角度の定義を用いる. 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.

$$x_t = g(\theta_t) \quad (1)$$

ここで(1)式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ようになる.

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

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目標値である. 本研究ではこの目標値 $\bar{\theta}_t$ に, WW Shutタスクの場合に視覚情報が得られている2分までの平均歩行周期のデータを用いる. WWタスクの場合も条件をそろえるために2分までの平均データを目標値とする. (2)式を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.

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

この時, 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.

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

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 $\Theta_t$ 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.

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

UCM空間に垂直な成分は以下のようになる.

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

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.

$$V_{UCM}^{jerk} = \frac{\Theta_{jerk\parallel,t}^2}{n-d} \quad (7)$$

$$V_{ORT}^{jerk} = \frac{\Theta_{jerk\perp,t}^2}{d} \quad (8)$$

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. またシナジーの度合いを定量的に評価す

のために手先ジャークの協調度を以下のように定義する。

$$\Delta V_{jerk} = \frac{V_{UCM}^{jerk} - V_{ORT}^{jerk}}{V_{TOT}^{jerk}} \quad (9)$$

ここで  $V_{TOT}^{jerk}$  は全分散を示している。  $\Delta V_{jerk} > 0$  は、性能変数が協調により制御されていることを表す [6]。協調度はシナジーの強弱を示しており、シナジーが強いということは関節間協調の度合いが高い、つまり性能変数を安定化させる方向の分散が全分散成分の中でより高い割合を示すということである。

### 2.5.2 コップの角度に関する UCM 解析

コップ角度の各分散成分の計算には図 2.B に示すような関節角度の定義を用いる。コップ (手先) の水平面からの角度  $\theta_{hor}$  を図 1.B に示した各関節角度を用いて表すと以下の式のようになる。

$$\theta_{hor} = [1, 1, 1, 1, 1] \cdot [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T \quad (10)$$

前節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 (7)、(8) に相当するものを以下のように定義する。

$$V_{UCM}^{angle} = \frac{\Theta_{angle||,t}^2}{n-d} \quad (11)$$

$$V_{ORT}^{angle} = \frac{\Theta_{angle\perp,t}^2}{d} \quad (12)$$

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。また、コップ角度に関する協調度も同様に以下のように定義する。

$$\Delta V_{angle} = \frac{V_{UCM}^{angle} - V_{ORT}^{angle}}{V_{TOT}^{angle}} \quad (13)$$

### 2.6 統計解析

以下に挙げる 3 つのことを確かめるために t 検定を用いた (有意水準  $\alpha = 0.05$ )。 (1) 手先のジャーク二乗和に各時間で WW タスクの場合と WW Shut タスクの場合で有意な差があるかどうか。 (2) 手先ジャークに関する協調度 ( $\Delta V_{jerk}$ ) に各時間で WW タスクの場合と WW Shut タスクの場合で有意な差があるかどうか。 (3) コップ角度に関する協調度 ( $\Delta V_{angle}$ ) に各時間で WW タスクの場合と WW Shut タスクの場合で有意な差があるかどうか。

## 3. 結果

### 3.1 手先ジャーク

図 3 に全ての被験者の進行方向の手先ジャークの二乗和を示す。タスクの後半になるにつれて視覚を遮断した場合の方が手先ジャークが大きくなる傾向にある。しかしながら、図 4 に示す、先行研究 [1] の手先ジャークと比較すると、その差は微小であり、水の有無ほどの差はなく、手先のジャークは小さくなっている範囲内であるといえる。

### 3.2 コップ角度

図 5 に全被験者のコップ角度の時系列を示す。視覚がある

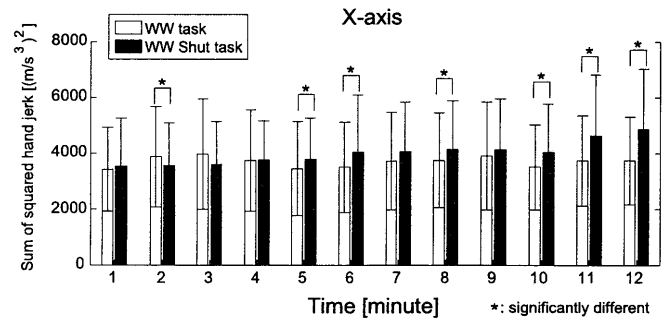


図 3 全被験者の手先ジャークの二乗和。横軸は 1 分ごとの時間を示しており、縦軸は歩行 1 周期分の手先ジャークの二乗和を示している。白いバーが WW タスクの結果であり、黒いバーが WW Shut タスクの結果である。\* は有意水準 5% で有意差がある箇所を示している。

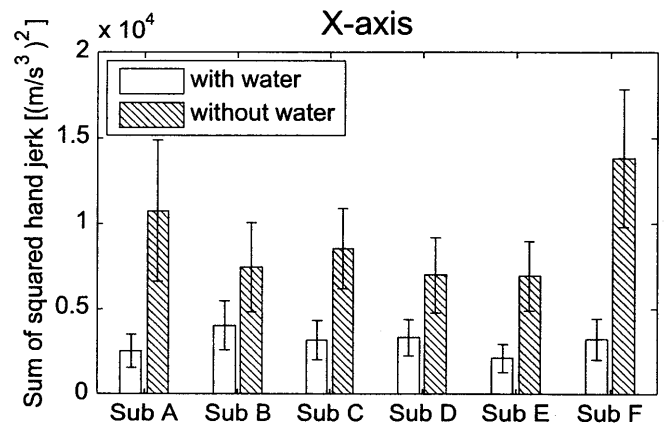


図 4 水の有無による手先ジャークの二乗和の違い [1]。横軸は被験者を示しており、縦軸は歩行 1 周期分の手先ジャークの二乗和を示している。白いバーがコップに水が入っている場合の結果であり、黒い斜線のバーがコップに水が入っていない場合の結果である。図 3 の実験とは歩く速度が若干異なり、0.56 [m/s] (2.0 [km/h]) で歩いた場合の結果である。

WW タスクの場合には、ほぼ一定の値を保っており、コップの角度が一定に保たれていることがわかる。一方 WW Shut タスクの場合、視覚情報が遮断された 2 分を境にゆっくりとコップ角度がずれて行っているのがわかる。特に被験者 A と B と C に関してはその傾向が顕著であった。

### 3.3 手先ジャークに関する分散成分

図 6 に手先ジャークに関する協調度を示す。タスク全体で有意差が認められ、WW Shut タスクの方が協調度が有意に大きくなっていったことがわかった。

### 3.4 コップ角度に関する分散成分

図 7 に全被験者のコップ角度に関する協調度を示す。視覚が遮断された 3 分以降で WW Shut タスクのほうが WW タスクよりも有意に協調度が低下していた。詳細な図は省くが、WW Shut タスクでは ORT 成分が顕著に増加していた。

## 4. 考察

本研究では、歩行中の手先振動抑制に対して、視覚情報がど

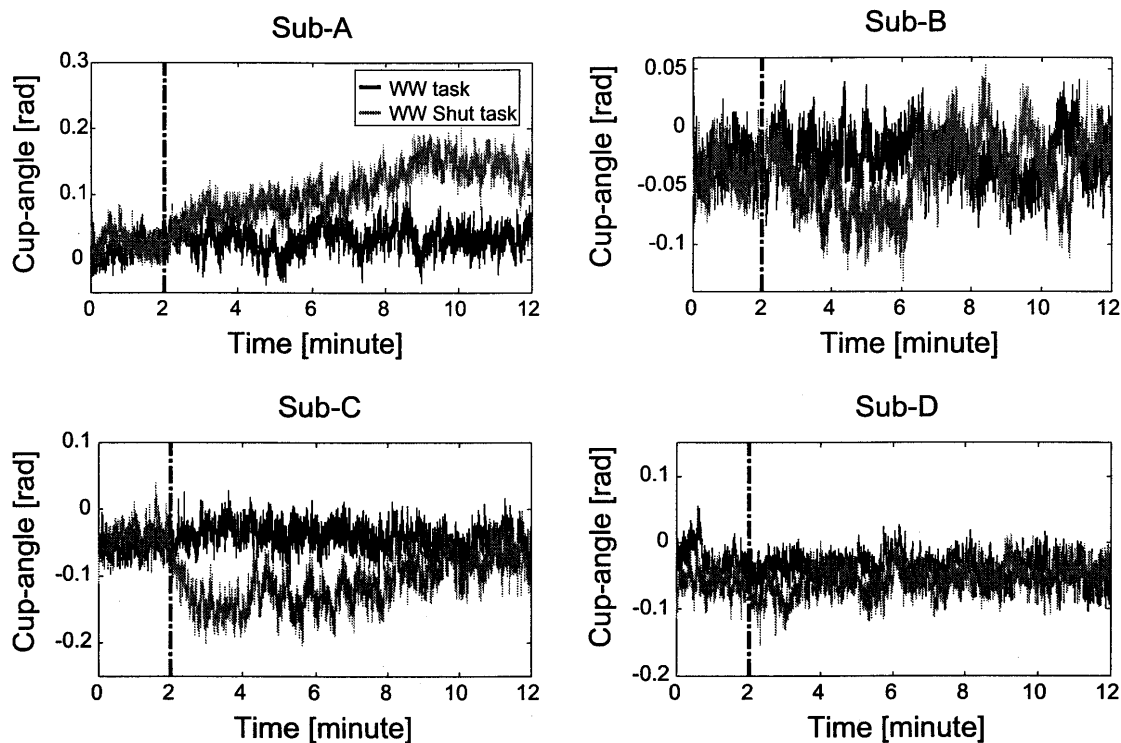


図5 全被験者のコップ角度の波形。左上が被験者 A, 右上が被験者 B, 左下が被験者 C, 右下が被験者 D の結果である。横軸が時間を示しており、縦軸がコップ角度を示している。黒い線が WW タスクの結果であり、灰色の線が WW Shut タスクの結果である。縦の黒い一点鎖線は視覚遮断の開始時刻を示している。

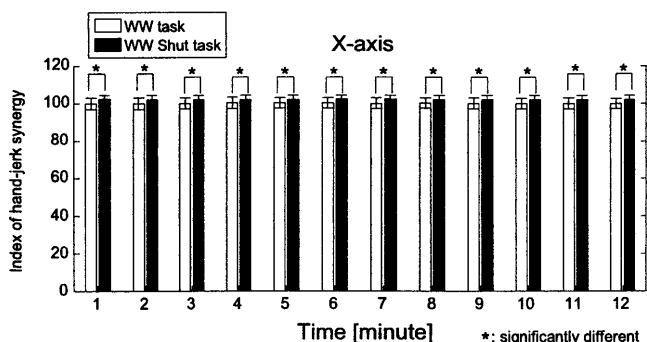


図6 全ての被験者の手先ジャークに関する協調度 ( $\Delta V_{jerk}$ )。この協調度は歩行1周期 (1-100%) の和をとったものである。横軸は時間を示しており、縦軸は手先ジャークの協調度を示している。白いバーが WW タスクの結果であり、黒いバーが WW Shut タスクの結果である。\* は有意水準 5% で有意差がある箇所を示している。

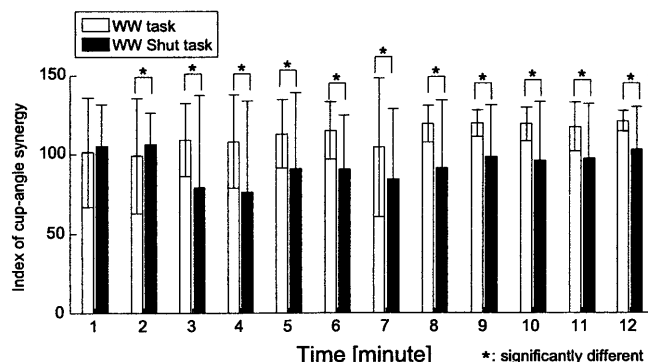


図7 全ての被験者のコップ角度に関する協調度 ( $\Delta V_{angle}$ )。この協調度は歩行1周期 (1-100%) の和をとったものである。横軸は時間を示しており、縦軸はコップ角度の協調度を示している。白いバーが WW タスクの結果であり、黒いバーが WW Shut タスクの結果である。\* は有意水準 5% で有意差がある箇所を示している。

のように扱われているのかについて調べた。はじめに歩行中の手先振動抑制における視覚情報の働きの1つは、コップ角度の知覚であるという仮説を立てた。手先振動を抑制しながらの歩行中に長時間、視覚情報を遮断する計測実験を行い、タスクを達成するために重要であると考えられる、手先のジャークとコップの角度を比較した。図3の結果より、手先のジャークに関しては値そのものはあまり変化せず、図6の結果より、タスク全体で協調度がわずかに増加した。図5の結果より、コップ角度に関しては視覚遮断後にゆっくりとドリフトしていき、図

7の結果より、協調度は低下した。これらの結果から、視覚情報はコップの角度に大きな影響を与えていることが分かった。特にコップ角度のドリフトに関して、手先位置情報の知覚実験においても時間依存のドリフトがあることが報告されている [7]。本実験で設定したタスクでは、定常歩行で安定している状態から瞬間的に視覚を閉じている。この時コップ角度に関して被験者は遮断前の状態を保持しようとすると考えられる。そこで、その保持しようとする情報が時間依存でドリフトしていくので

はないかと考えられる。何故なら、保持しようとする情報は手先位置知覚実験で保持しようとする情報と同質のものであると考えられるからである。この結果は短時間視覚遮断実験では見られなかった [2] ことから、誤差が蓄積する時定数は比較的大きく、視覚情報によるコップ角度のキャリブレーションによってその誤差を解消していることが示唆される。

協調運動と視覚情報の関係の先行研究例として次の二つがあげられる。1つは Tseng らのリーチング運動に関する研究である [8]。リーチング運動に関しては性能変数は手先位置であり、運動要素は関節角度である。結果は利き手ではない方（慣れない方）の運動後半のみ、有意に分散が増加し、UCM 成分、ORT 成分共に上昇していた (UCM > ORT) [8]。利き手に関しては有意な差がなく、リーチングのような短時間の運動では協調動作に差が出ないものと考えられる。また、他の運動タスクにおいても、視覚情報は予測的に働くことが報告されている [10]。よって本研究の短時間視覚遮断実験も同様に、視覚が遮断されても予測的に性能変数の値を推定・保持するので、視覚の有無によって差が出なかったものと考えられる。

もう1つは Krishnamoorthy らの静止立位に関する研究である [9]。静止立位の場合は性能変数は重心位置であり、運動要素は関節角度である。結果は視覚遮断の場合には UCM 成分が有意に増加し、ORT 成分は有意な差が認められなかった [9]。静止立位の場合、重心位置が知覚可能であるのかは議論の余地があるものの、視覚情報以外の前庭情報や足圧などから推定できると考えられる。よって、視覚情報が遮断されたとしても、その他の知覚情報を用いてより強い協調動作（つまり大きな UCM 成分）を行うことで制御を行ったと考えられる。本研究の長時間視覚遮断実験における、手先のジャークに関しても、WW Shut タスクにおいては、協調度がわずかに大きかった。しかしながらこれは、タスク全体での変化であった。これには次の2つの原因が考えられる。1つはタスク間の誤差である。タスク間には1度運動を停止しているために起こる誤差があるが、全被験者を通しての傾向であるため、可能性は低い。もう1つはタスク自体の難易度の違いによるものである。被験者には事前に2分後に視覚が遮断されることが伝えられていた。このことが影響し、タスクのはじめから通常とは若干異なる協調パターンで運動を行った可能性が考えられる。いずれにせよ、手先ジャークに関しては視覚遮断の影響をほとんど受けていないことからジャークの抑制はなんらかの情報をフィードバックし制御するというよりも、フィードフォワード的な運動がすでに獲得されており、定常歩行においてはその獲得された運動が調節された協調パターンを用いている可能性が高いと考えられる。またコップの角度に関しては、先行研究のリーチング軌道や重心位置のタスクのように保持しようとする性能変数の情報が、時間依存でドリフトしていくために性能変数の目標値がずれ、協調が低下していると考えられる。よって安定した運動協調には性能変数の知覚が重要であるといえる。

以上の結果から、視覚情報はコップの角度という性能変数が時間ドリフトするのを防ぐためにキャリブレーションをするのに用いられており、安定した関節間協調の維持には性能変数の

知覚が重要であることが示唆される。

## 5. まとめ

本研究では、歩行中の手先振動抑制に対して、視覚情報がどのように扱われているのかについて調べた。水が入っているコップを持って歩いている途中で長時間、視覚情報を遮断する実験によって、タスク達成のために重要であると考えられる変数（手先のジャークとコップの角度）がどのように変化するかを調べた。その結果、手先ジャークの値と、その協調にはほとんど影響が見られなかったが、コップ角度についてはゆっくりとドリフトしていき、その協調度は視覚遮断によって低下した。このことから、定常的な手先振動の抑制に対して視覚情報は、コップ角度のキャリブレーションに用いられていることが示唆された。また、協調動作の維持には性能変数の知覚が重要であることも示唆された。今後の課題として、定常時ではなく、外乱を与えた際に視覚情報はどのような働きを示すのかを調べることが挙げられる。予備実験で、振動抑制中にインパルス状外乱を手先に与えたところ、コップの有無、視覚の有無の条件によって異なる応答を示した。手先スティフネスと関連付けて、詳しく解析する予定である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり貴重な助言をいただいた、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] 東郷俊太, 香川高弘, 宇野洋二. 歩行中の手先振動を抑制する方策に対する UCM 解析. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J93-D, No. 12, pp. 2666-2674, 2010.
- [2] 東郷俊太, 香川高弘, 宇野洋二. 歩行中の手先振動の抑制に対する視覚の働き. 第 25 回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp. 139-142, 9 2010.
- [3] John P. Scholz and Gregor Schöner. The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Exp Brain Res*, Vol. 126, pp. 289-306, 1999.
- [4] Mark L. Latash, John P. Scholz, and Gregor Schöner. Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. *Exerc Sport Sci Rev*, Vol. 30, pp. 26-31, 2002.
- [5] 北川哲生, 福田浩士, 福村直博, 宇野洋二. ヒトの運動が手先の位置知覚に与える影響. 信学技報, 第 NC2004-151 巻, pp. 83-88, 3 2005.
- [6] Mark L. Latash. Stages in learning motor synergies: A view based on the equilibrium-point hypothesis. *Human Movement Science*, Vol. 29, pp. 642-654, 2010.
- [7] Liana E. Brown, David A. Rosenbaum, and Robert L. Sainburg. Limb position drift: Implications for control of posture and movement. *J Neurophysiol*, Vol. 90, pp. 3105-3118, 2003.
- [8] Yaweng Tseng, John P. Scholz, and Gregor Schöner. Goal-equivalent joint coordination in pointing: Affect of vision and arm dominance. *Motor Control*, Vol. 6, pp. 183-204, 2002.
- [9] Vijaya Krishnamoorthy, Jeng-Feng Yang, and John P. Scholz. Joint coordination during quiet stance: effects of vision. *Exp Brain Res*, Vol. 164, pp. 1-17, 2005.
- [10] 山近慎二, 阪口豊. お手玉の運動制御における視覚情報の役割. 信学技報, 第 NC97-130 巻, pp. 223-228, 3 1998.