

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540116

研究課題名(和文) 子どもが行う普通救急救命のための胸骨圧迫最適化

研究課題名(英文) Motion optimization for chest compression by elementally school students

## 研究代表者

岡田 昌史 (Okada, Masafumi)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60323523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：胸骨圧迫は救急救命の中でも最も重要な行為である。しかし、胸骨圧迫には大きな力を必要とするため、長時間運動を続けるためにエネルギー消費の小さな適切な運動をする必要があるが、適切な運動は訓練者の身長、体重に大きく依存し、体格に合った運動を求める必要がある。本研究では、運動学、動力学の観点から胸骨圧迫を体格に合わせて最適化する手法を提案した。擬似微分と零位相フィルタによって信号の速度、加速度を求める手法を提案し、トルク最小化問題を関節角度の最適化問題に帰着させた。また、小学生の胸骨圧迫を対象として、運動の最適化と同時に背負う重りの最適化も行い、心拍数の計測によりその有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：The chest compression is one of the most important actions for first-aid cardiopulmonary resuscitation. Because it requires large torque/force to be generated, the performers have to take an energy saving position and motion until advanced life support providers take over. The energy saving motion strictly depends on the body weight and height of the performers. In this research, the chest compression is optimized from kinematic and dynamic point of view. By using Pseudo-differential and zero-phase filter, the angular velocity and acceleration are derived from a motion capture data, and generative force is calculated by inverse dynamic computation. Based on an evaluation function and constraints, the chest compression is optimized kinematically, dynamically and temporally. Moreover, for the chest compression of a child with light weight, a motion aid is optimized. The effectiveness of the proposed method is evaluated based on a physical load of the performers by measuring heart rate.

研究分野：ロボット工学

キーワード：胸骨圧迫 運動最適化 データフィルタ

### 1. 研究開始当初の背景

胸骨圧迫は心臓マッサージのひとつであり、救急隊が到着するまでの一次救命措置として、AED と並んで患者の生存率を大きく向上させている。これより、一般の人に広く普及することが望まれ、普通救命講習会が数多く行われている。これまでに胸骨圧迫を適切に行うための強調した目標姿勢の導出を行ってきた。胸骨圧迫は手先から発生する力が重要であり、これは内力となる。そのため、講習会における指導員のデモンストレーションからだけではその量が伝わりにくいことに注目し、力学的な考察から運動中に目指すべき姿勢の導出を行い、これが内力を伝えるために有効であることを示した。しかし、この姿勢は指導者の運動をもとにして導出した結果であり、体格の異なる訓練者に対しては適当な姿勢とは言いにくい。特に、家庭内で心肺停止者が発生した場合に、多くの家族が適切な胸骨圧迫を施すことが必要であることから、最近では子ども(主に小学校高学年)を対象とした普通救命講習会が開催されている。実際、子どもが高齢者の胸をたたく、胸の上で跳ねるといった行為により、心肺が復帰した例も報告されている。体格に合った適切な胸骨圧迫運動を定め、これを講習会によって指導することは、心肺停止者の生存率を著しく増加させるために重要なことである。

### 2. 研究の目的

本研究では、胸骨圧迫を普及させるべく、体格に適した継続可能な(楽な)最適運動姿勢を動力学的に求めると同時に、小学生でもこの運動が可能となるような姿勢、あるいは、道具の使用方法、および、道具の最適化(重りの質量など)を行うことを目的とする。胸骨圧迫はAEDと共に心肺停止者の生存率を大きく向上させるものであるが、一般の人が患者に施す直接的な治療法であるため、ハードルが高く普及しにくい。そこで、講習会を通して幼年期からこの治療法の重要性を周知させること、その際に、道具の利用などにより、子どもでも可能な胸骨圧迫法を示すこと、さらに、この結果を国際ガイドラインへ提案し、新たなガイドラインの補助を行うことを目指す。運動の姿勢最適化では、ロボティクスの知識を利用し、姿勢(運動学)と運動(動力学)の同時最適化問題に帰着させ、体格に合致した運動の導出を行う。胸骨圧迫の普及では東京防災救急協会の協力のもと、小学生を対象とした講習会の開催を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず、(1)最適な胸骨圧迫運動を求める方法を提案する。ここでは、閉リンク系の拘束条件付き運動学と動力学の間

時最適化問題に帰着させ、一連の運動の中でトルクの積分値を最小化する運動として求める。これにより、体重が軽い場合でも、上体の慣性力を利用した胸骨圧迫を可能とする運動を求める。次に、(2)熟練者のモーションキャプチャデータに基づいて、提案手法の有効性を検証すると同時に、(3)小学生の胸骨圧迫運動を求める。その後、(4)これまでに提案してきた運動の強調姿勢提示法を利用して、小学生が適切に胸骨圧迫を可能とする訓練法を示す。

### 4. 研究成果

#### (1). 身体に合わせた胸骨圧迫運動最適化

胸骨圧迫を行う人間のリンクモデルを図1のように設定する。リンク1, 2, 3はそれぞ

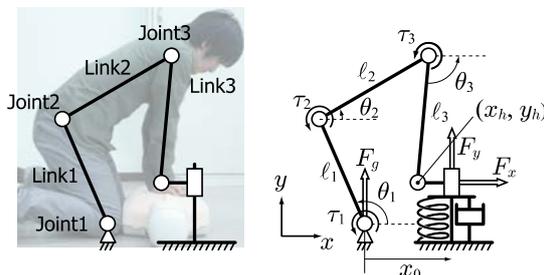


図1 胸骨圧迫の力学モデル

れ大腿部、胴体、腕に相当し、関節1, 2, 3は膝、腰、肩に相当する。圧迫対象はばね・ダンパでモデル化した。これより、リンクモデルの運動方程式

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + K(\theta) = \tau \quad (1)$$

を得る。ただし、 $M$ は慣性行列、 $C$ は遠心力、コリオリ力、 $K$ は重力、ばね力であり、

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]^T \quad (2)$$

$$\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T$$

で定義される。また、 $x_0$ は膝と圧迫対象の距離を表す。本研究の目的は、評価関数

$$J = \int \tau^T \tau dt \quad (3)$$

を最小化する $\theta = \theta(t)$ と定数 $x_0$ を求めることにある。これは運動学的最適化(姿勢の最適化)、動力学的最適化(動きの最適化)を含むものである。ここでは、 $\theta$ を

$$\Theta = \{\theta[1] \quad \theta[2] \quad \dots \quad \theta[N]\} \quad (4)$$

のように離散時間時系列データで与え、 $J$ の $\theta[k]$ による勾配、 $x_0$ による勾配を求め、勾配法によって最適化を行った。すなわち、設計変数は $\theta[k] (k = 1, 2, \dots, N)$ および $x_0$ となる。また、式(3)はトルクを評価関数としていることから、この計算には $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ の情報が必要となる。しかし、式(4)の情報だけでは速度、加速度の情報は得にくい。そこで、本研究では、運動が周期的であることを利用して、擬似微分と零位相フィルタを用いて速度、

加速度情報を得る手法を提案した。  
伝達関数が

$$G_0(s) = \frac{F}{s+F} \quad (5)$$

で表されるローパスフィルタに対して、図 2

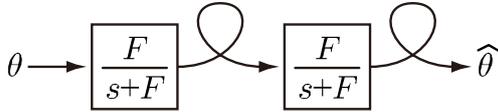


図 2 零位相フィルタ

のように、時系列データ  $\theta$  にフィルタを施した後に時間の流れの順番を入れ替え、再度フィルタを施し、最後に順番を入れ替えるものを零位相フィルタと呼ぶ。これによりローパスフィルタによる時間遅れがキャンセルされ、位相遅れが零となる。本研究では、

$$G_1(s) = \frac{sF}{s+F} \quad (6)$$

のフィルタを施した後に式(1)のフィルタを施す零位相フィルタにより  $\hat{\theta}$  を得て、式(6)のフィルタを 2 回用いることで  $\theta$  を得た。これは、

$$\dot{\Theta} = \Theta G^0 R G^1 R \quad (7)$$

$$\ddot{\Theta} = -\Theta G^1 R G^1 R$$

のように、簡単な行列の積で表すことができる。これにより、 $\Theta$  のみを設計変数とすることが可能となる。なお、 $G^0$ 、 $G^1$  はそれぞれ  $G_0(s)$ 、 $G_1(s)$  の伝達関数のインパルス応答からなる行列であり、 $R$  は

$$R = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

のように時系列データを並び替える行列を表している。

提案手法を用いて運動を最適化した結果を図 3 に示す。黒線は熟練者(救命士)のモー

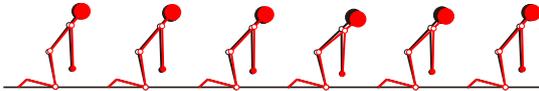


図 3 熟練者の運動と最適化運動

ションキャプチャデータであり、赤線は最適化された運動を表す。この結果から、熟練者の動きはほぼ最適化された運動(トルク最小化運動)であることが理解できる。一方、図 4

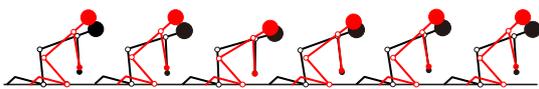


図 4 初心者の動きと最適化運動

は初心者の動き(黒実線)と最適化された運動(赤実線)を表している。熟練者とは体格が異なるため、異なる運動となっている。この初心者は、運動を開始する前に熟練者から適

切な指導を受けたが、膝の着く位置が異なっていたこと、適切な力の出し方を理解していなかったことが考えられる。図 5 は最適化前と最適化後の腰のトルクを表している。最適

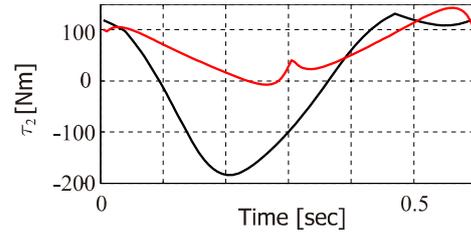


図 5 最適化前後の腰の発生トルク

化前(黒実線)に比べ、最適化(赤実線)により発生するトルクが小さくなっていることが理解できる。なお、肩、膝のトルクも同様に小さくなった。これらの結果から、提案手法によって楽に胸骨圧迫を行える運動が導かれたことが理解できる。

## (2) 胸骨圧迫の時間最適化

(1) では関節角度の時系列データを最適化した。特に、圧迫深さは 5cm であることを拘束条件として最適化を行っており、これはある時刻における  $\theta$  に拘束条件を与えることで解を導いた。しかし、このタイミングは体重に依存することが考えられる。すなわち、体重による慣性力を適切に利用することで圧迫タイミングは変化し、発生トルクの低減化が予想される。そこで本研究では、このタイミングを最適化する手法を考えた。

設計変数が  $\theta$  の時系列データであることから、拘束条件が最適化途中に変化する(圧迫深さ 5cm の時刻を変化させる)ことは適切な収束を阻害する。そこで、本研究では図 6 にあるように、時系列データ間のサンプリングタイムを変化させる手法を提案した。すなわ

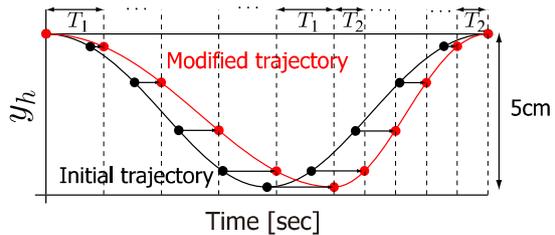


図 6 サンプリングタイムの最適化

ち、開始から圧迫までのサンプリングタイムを  $T_1$ 、その後の解放までのサンプリングタイムを  $T_2$  とし、その和が一定となる拘束条件の下、 $T_1$  を設計変数とした最適化を行う。これにより、圧迫時間が任意の時間をとることができる。この手法では時間が増えるに伴って速度、加速度の計算も変化させる必要があるが、これは式(7)の  $G^0$ 、 $G^1$  を  $T_1$  に合わせて変えることで対応可能である。

このときの結果を図 7 に示す。元の運動(黒実線)の圧迫時刻が 0.26 秒であったのに対し、最適化を行うことで 0.33 秒となった。その差はあまり大きくないが、時間の最適化を組み込むことで適切な胸骨圧迫の運動が変化

する様子が理解できる.

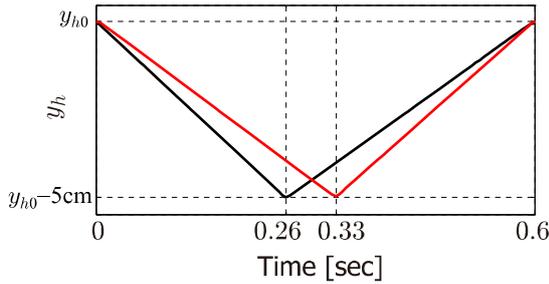


図7 胸骨圧迫の時間最適化

(3). 子どもが行う胸骨圧迫運動最適化

(1), (2) で提案した手法を用いて, 子どもが行う胸骨圧迫の最適化を行った. なお, 子どもの腕, 脚, 胴体の長さの比は熟練者のものと同じものとし, 体重に比例して質量配分を行った. この結果, 最適化途中に膝からの床反力が負になることが導かれ, 37kg 以下の体重では適切な胸骨圧迫ができないことが導かれた. これは, 一般に胸骨圧迫には 35kg 以上が必要であると言われている結果に一致している. そこで, 体重が軽い場合に, 図8のように重りを背負うことを考えた. こ

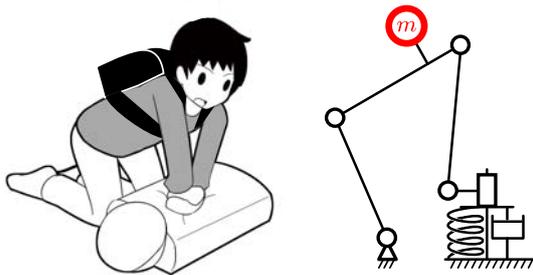


図8 重りを背負った胸骨圧迫

れは, 足りない体重を補うことを目的としたものである. また, 重りの質量  $m$  も設計変数とし, 胸骨圧迫の最適化を行った. 結果を図9に示す. このグラフは横軸が体重, 縦軸は必要な重りの重さを表している. また, 図10は重りを用いた場合と用いない場合の評価

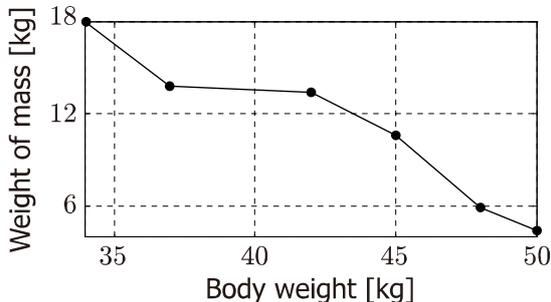


図9 体重に対する最適な重り

関数の値を示している. この結果から, 体重が約 50kg 以上の場合には重りは必要とせず, さらに, 体重が軽い場合には 10kg 程度の重りを背負うにも関わらず, 発生する関節トルクは小さくなる事が分かる. 図11は 42kg の体重の人に適切な重りを設定した場合の胸骨圧迫の動きを表している. 黒実線は重り

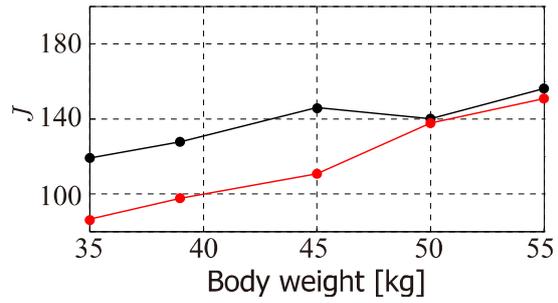


図10 重り有り/無しによる評価関数



図11 重りを用いた胸骨圧迫最適化

を用いない場合, 赤実線は適切な重りを設定した場合である. 重りを背負うことにより, 重りの慣性力を生かした胸骨圧迫を行うために, 膝を着く位置が圧迫対象者から大きく離れることが分かる.

次に, 提案した手法の有効性を検証するために重りを背負った状態での胸骨圧迫講習会を開き, そのときの身体負担として心拍数の計測を行った. 重りとしては, 図12にあるように, スポーツ訓練用のウェイトジャケットを用いた. これは, 重りをポケットに入れることでジャケットの質量を調整可能である. また, 胸部には心拍数計測器(サン

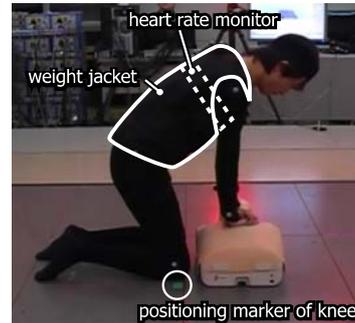


図12 重りを用いた胸骨圧迫

リングタイム 5 秒)を装着した. 訓練者の身体パラメータを表1に示す.

表1 訓練者の身体パラメータ

訓練者	身長 [cm]	体重 [kg]	重り [kg]	性別	年齢
A	171	48	6.6	男性	20代
B	156	46	7.0	女性	50代
C	158	50	4.4	女性	60代

胸骨圧迫を行ったときの心拍数の遷移を図13に示す. 黒破線は重りを用いない場合, 赤実線は重りを用いた場合を表している. 本来, 胸骨圧迫は激しい運動であり, あまり長時間の計測は行えなかったが, いずれの訓練者に対しても, 重りを用いることで心拍数が下がる結果が得られた. なお, 訓練者 B, C は救命士であり, 特に, 訓練者 B においては A, C に比べ, 重りを用いても心拍数の大きな現象は見られなかった. これは訓練者 B がす

でに自分の適切な胸骨圧迫を獲得しており、こちらが指示した膝の位置では極めて運動をしにくいことを主張していたことによると考えられる。

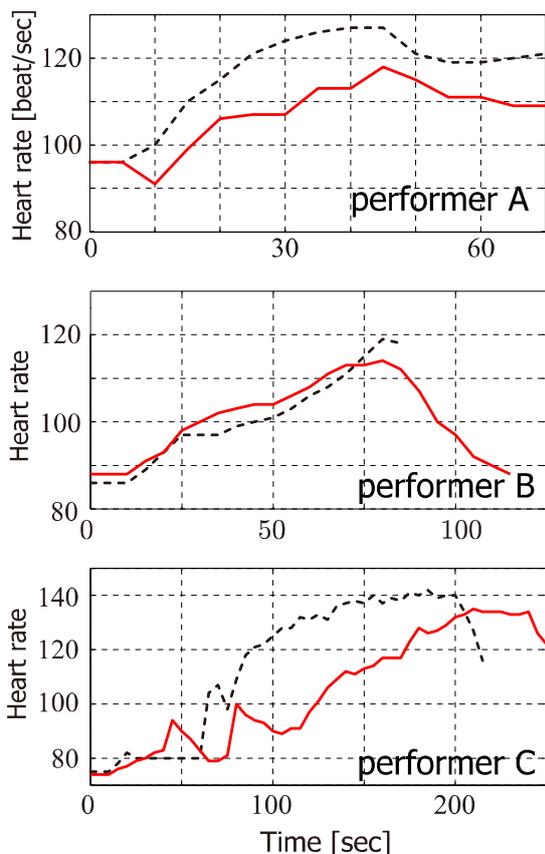


図 13 胸骨圧迫における心拍数の遷移

これらの結果をまとめ、提案手法の有効性、特に、体重が軽い場合に重りを用いること、重りの質量を最適化することの有効性が理解できる。

なお、胸骨圧迫の適切な方法について、東京防災救急協会の救命士の方々にご指導いただいた。ここに感謝申し上げます。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- [1] 岡田昌史, 萱島 駿, 擬似目標値を用いた救急救命のための胸骨圧迫運動教示とその評価, 日本機械学会論文集(C編), 79巻, 800号(2013-4), pp.1090-1101, 2013年4月(査読有り, DOI: 10.1299/kikaic.79.1090)

[学会発表] (計 2 件)

- [1] 萱島 俊, 岡田昌史, 運動最適化に基づく胸骨圧迫補助道具の設計と評価, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(Robomec2014), 3A1-002, 2014年5月28日, 富山県, 富山国際会議場)
- [2] 萱島 駿, 岡田昌史, 胸骨圧迫における

運動の時間最適化, 第31回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2013AC2F1-07(CD-ROM), 2013年9月4日~6日, 東京都, 首都大学東京・南大沢キャンパス)

- [3] 萱島 駿, 岡田昌史, 胸骨圧迫補助道具の設計, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(Robomec2013), 2A2-C11, 2013年5月24日・25日, 茨城県, つくば国際会議場.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 昌史

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 60323523