



Bakalářská práce

Vizualizace pracovní polohy dle MOCAP

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Michal Strnad

Vedoucí práce:

Ing. Miroslav Vavroušek, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Vizualizace pracovní polohy dle MOCAP

<i>Jméno a příjmení:</i>	Michal Strnad
<i>Osobní číslo:</i>	S20000312
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra výrobních systémů a automatizace
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je vytvořit aplikaci pro vizualizaci polohy těla na základě Motion capture dat. Vizualizována bude celková postava a samostatně jednotlivé segmenty těla s hodnocením pracovní polohy dle ergonomického posouzení.

- Výběr vhodného nástroje pro tvorbu aplikace.
- Integrace MOCAP záznamu do aplikace.
- Tvorba a editace skeletonu.
- Propojení MOCAP dat se skeletonem.
- Vizualizace nasnímaných poloh prostřednictvím skeletonu na postavu.
- Vizualizace polohy jednotlivých segmentů těla.
- Hodnocením pracovní polohy dle ergonomického posouzení.
- Souhrn hlavních aspektů zpracování MOCAP dat.

<i>Rozsah grafických prací:</i>	dle potřeby
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	30-40 stran
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	čeština

Seznam odborné literatury:

1. KERLOW, Isaac Victor. Mistrovství 3D animace: ovládněte techniky profesionálních filmových tvůrců. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2011, 380-381 s. ISBN 978-80-251-2717-9
2. Motion Capture Process, Techniques and Applications: Acoustical System [online]. 2013, Volume:1, Issue: 4 [cit. 2015-04-22]. ISSN 2321 8169. Dostupné z: http://www.ijritcc.org/download/IJRITCC_1350.pdf
3. O'ROURKE, Michael. Principles of three-dimensional computer animation: modeling, rendering, and animating with 3D computer graphics. Rev. ed. New York: Norton, c1998, 285 p. ISBN 03-937-3024-7
4. ALEXANDER, Gregory L. et al. Markerless Human Motion Capture-Based Exercise Feedback System to Increase Efficacy and Safety of Elder Exercise Routines. 6th International Conference of International Society for Gerontechnology. Pisa, Italy, 2008. s. 73-78. [cit. 2019-09-01] Dostupné z WWW: <https://www.eldertech.missouri.edu/papers>
5. BUCHANAN, Matt; JOHNSON, Joel. Gizmodo [online]. 5. srpna 2010 [cit. 2019-09-01]. Deep Inside Xbox 360 Kinect and Why Its the Future of Microsoft. Dostupné z WWW: <https://gizmodo.com/tag/project-natal>
6. SLATER, Mel; STEED, Anthony; CHRYSANTHOU, Yiorgos. Computer graphics and virtual environments: From Realism To Real-Time. New York: Addison Wesley, 2002. 571 s. ISBN 02-016-2420-6
7. ŽÁRA, Jiří. Moderní počítačová grafika. 2., přeprac. a rozš. vyd. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 8025104540.
8. VINKLER, Michal. Snímání a rekonstrukce pohybu postavy. Snímání pohybu: Pojem snímání pohybu [online]. 2009, s. 2 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/208036/fi_b/bc.pdf
9. PLHÁKOVÁ, Lenka. Tvorba kosterního systému a animace lidské figury v programu Cinema 4D. [online]. 2011, s. 6 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/325447/fi_b/Bakalarska_prace.pdf
10. JAREŠOVÁ, Miroslava. Zachycení a vizualizace pohybu v reálném čase [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-09-01]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/324777/fi_b/Jaresova_text_prace.pdf. Bakalářská práce. Fakulta Informatiky

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Vavroušek, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání práce: 6. listopadu 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 6. května 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
garant studijního programu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Vizualizace pracovní polohy dle MOCAP

Abstrakt

Tato práce se zabývá tvorbou aplikace v prostředí Unity 3D pro vizualizaci pracovní polohy s podrobnou ergonomickou analýzou. Vstupem pro aplikaci jsou data získaná z MOCAP systému Vicon, která lze v aplikaci přehrávat. Aplikace z dat vyhodnocuje úhlové odchylky končetin od neutrálních poloh a využívá metodu RULA pro hodnocení rizika polohy. Tyto hodnoty lze exportovat a jsou výstupem aplikace.

Klíčová slova

Ergonomie, bezpečnost práce, RULA, MOCAP, záznam pohybu, Vicon, Unity 3D, C#

Visualization of working positions according to MOCAP

Abstract

This thesis deals with the development of an application in Unity 3D environment for work position visualization with detailed ergonomic analysis. The input for the application is data obtained from the Vicon MOCAP system, which can be played back in the application. From the data, the application evaluates the angular deviations of the limbs from neutral positions and uses the RULA method for position risk assessment. These values can be exported and are the output of the application.

Keywords

Ergonomics, work safety, RULA, MOCAP, motion recording, Vicon, Unity 3D, C#

Poděkování

Autor by tímto chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu **Ing. Miroslavu Vavrouškovi, Ph.D.** a panu **Ing. Janu Vavruškovi, Ph.D.**, za jejich vedení, spolupráci, konzultace, připomínky a zejména za čas, který mi věnovali.

Obsah

Úvod	10
1 Ergonomie	13
1.1 Zaměření ergonomie	14
1.2 Aplikace ergonomie v praxi.....	16
1.2.1 Základní ergonomické principy	17
1.2.2 Významné faktory při návrhu pracoviště.....	18
1.3 Metody a techniky ergonomické analýzy pracovní polohy	19
1.4 Prostředky k vyhodnocení ergonomické analýzy	20
1.4.1 Metoda RULA a REBA	21
1.4.2 Metoda OWAS	23
1.4.3 Hodnocení pracovních poloh dle legislativy ČR	24
1.5 Digitalizace v ergonomii.....	26
2 MOCAP technologie	27
2.1 Typy MOCAP systémů	28
2.2 Digitální model člověka.....	29
2.2.1 Skeletální struktura DHM	29
2.2.2 Adaptace skeletonu na různé tělesné typy	30
3 Nástroj pro automatizované vyhodnocení ergonomické analýzy	31
3.1 Schematická struktura analýzy MOCAP záznamu s aplikací.....	32
3.2 Pořízení MOCAP záznamu.....	33
3.2.1 Komponenty optického MOCAP systému Vicon	33
3.2.2 Pořízení záznamu	34
3.3 Orientace a popis základních prvků v uživatelského rozhraní aplikace	35
3.4 Výběr vhodných nástrojů pro tvorbu aplikace.....	37
3.5 Integrace MOCAP záznamu do aplikace.....	38
3.6 Tvorba DHM	39
3.7 Propojení MOCAP dat se skeletonem a vizualizace segmentů	40
3.8 Hodnocení pracovní polohy dle ergonomického posouzení	42
Závěr	46
Zdroje	47
Přílohy	49

Seznam zkratek

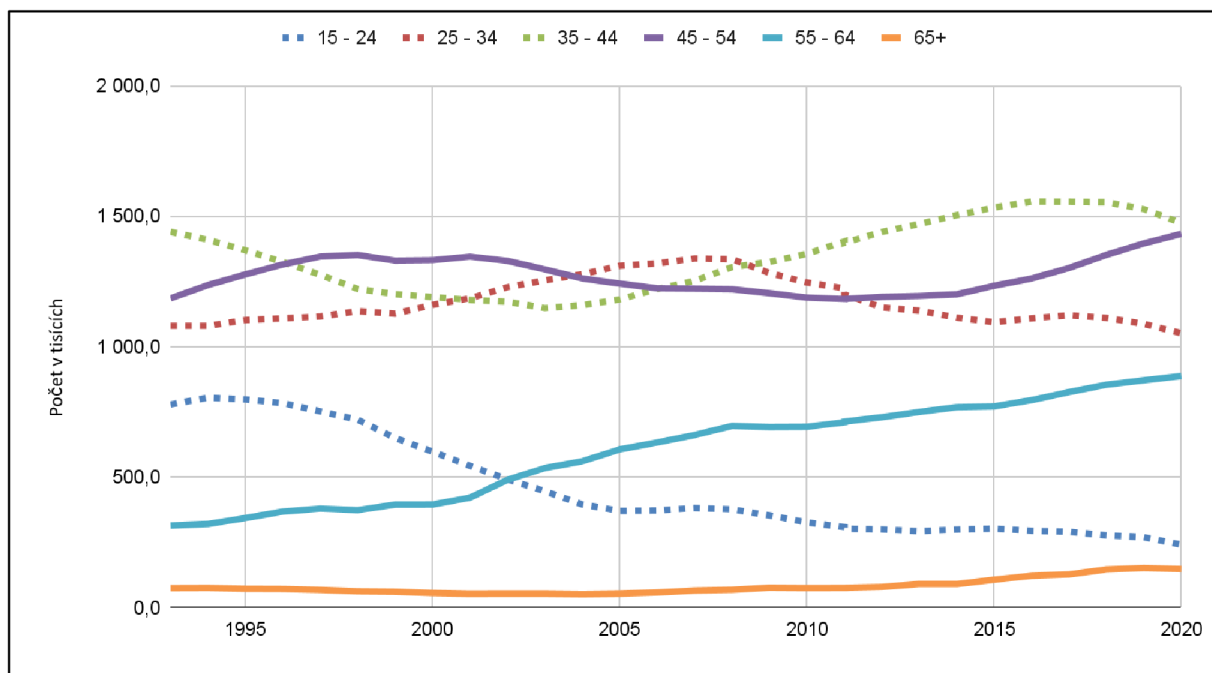
IEA	International Energy Agency Mezinárodní ergonomická asociace
HFE	Human Factors and Ergonomics Ergonomie lidských faktorů
MSD	Musculoskeletal Disorder Muskuloskeletální poruchy
RULA	Rapid Upper Limb Assessment Rychlé posouzení horních končetin
REBA	Rapid Entire Body Assessment Rychlé posouzení celého těla
OWAS	Ovako Work Analysis System
DHM	Digital Human Model Digitální model člověka
MOCAP	Motion Capture Záznam pohybu
IMU	Inertial measurement unit Inerciální měřicí jednotka
SÚIP	Státní úřad inspekce práce

Úvod

Tato práce se zaměřuje na ergonomii a její aplikaci v digitálním prostředí za využití moderní technologie MOCAP jako zdroj dat a digitální vizualizace a automatizované vyhodnocení pracovní polohy. Cílem práce je vytvořit aplikaci, která dovolí načíst sekvenci MOCAP dat. Zpracovaná data aplikace umožňuje přehrávat a vizualizovat pomocí standardních funkcí přehrávačů obsahu jako pozastavení záznamu, změna rychlosti přehrávání anebo posun na dané místo v čase. Aplikace načtená MOCAP data promítne na digitální model člověka a detailně zobrazit pracovní polohu včetně jednotlivých částí těla spolu s ergonomickým vyhodnocením a podrobnou analýzou aktuální pracovní polohy s možným vyexportováním analýz a vyhodnocení.

Podle nejnovějších demografických projekcí Českého statistického úřadu se očekává, že do roku 2050 dojde v České republice, stejně jako v mnoha dalších státech, ke značným změnám ve věkové struktuře obyvatelstva. Předpovídá se, že největší věkovou skupinu budou tvořit lidé starší 65 let, přičemž průměrný věk dosáhne téměř 50 let. Tyto změny představují významnou výzvu nejen pro zdravotní systém a systémy sociálního zabezpečení, ale rovněž pro trh práce, kde dojde k posunům v nabídce a poptávce po pracovních silách. [16]

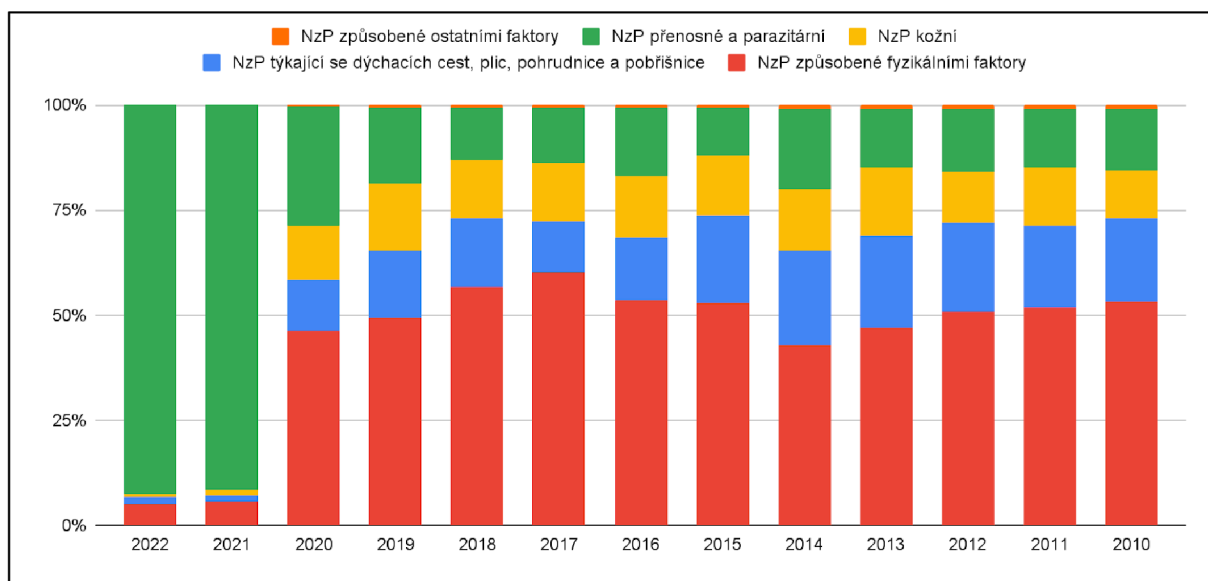
Z grafu prezentovaného na **Obrázek 1** vyplývá, že na trhu práce je stále více lidí starších 45 let, což je zobrazeno pomocí plnými čarami. Naopak, populace ve věkové kategorii od 15 do 44 let vykazuje klesající trend, což je na grafu znázorněné tečkovanými čarami.



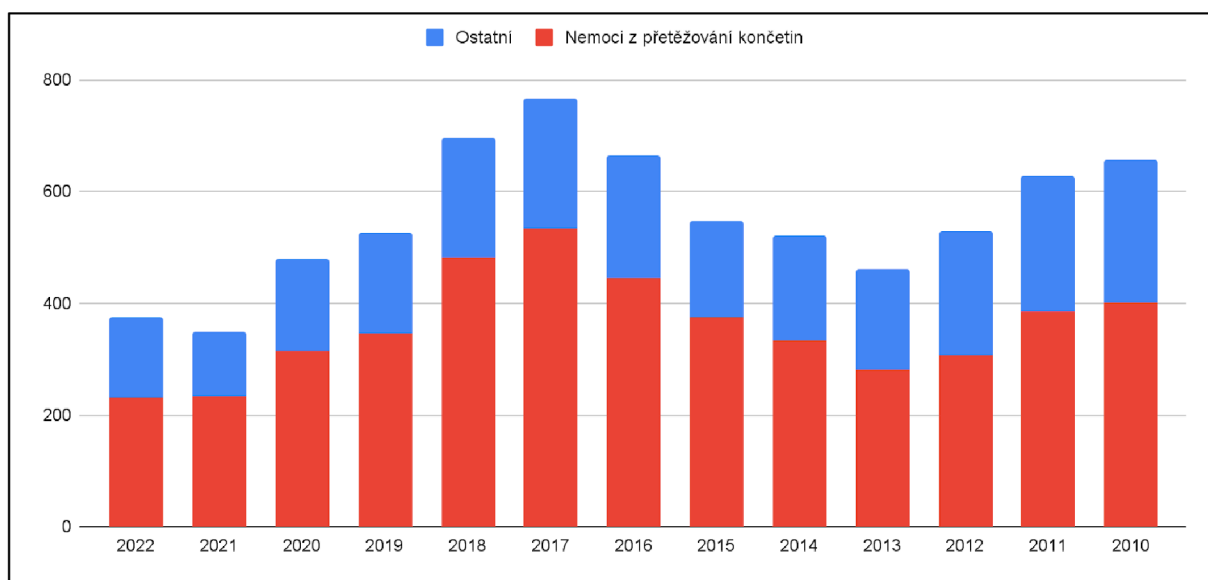
Obrázek 1 Věkové zastoupení na trhu práce [17]

S postupujícím stárnutím populace lze očekávat zvýšené riziko vzniku nemocí z povolání, včetně muskuloskeletálních onemocnění, sluchových poruch, kožních nemocí nebo respiračních problémů.

Na grafu uvedeném na **Obrázek 2** je ilustrováno procentuální rozdělení příčin nemocí z povolání, vyloučíme-li roky 2021 a 2022, kdy měla pandemie COVID-19 a související přenosné či parazitární nemoci značný vliv. Mimo toto výjimečné období jsou přibližně polovinou všech hlášených pracovních onemocnění způsobeny fyzikálními faktory, jako je ionizující záření, hluk, vibrace nástrojů a přetěžování končetin. Blíže graf na **Obrázek 3** zobrazuje zastoupení nemocí z povolání způsobené fyzikálními faktory přetěžováním končetin.



Obrázek 2 Procentuální zastoupení faktorů způsobujících nemoci z povolání [18]



Obrázek 3 Zastoupení hlášených nemocí z povolání způsobených fyzikálními faktory z přetěžování končetin [18]

Přetěžování končetin, způsobené vykonáváním práce, která vyžaduje intenzivní svalovou sílu nebo se vyznačuje monotónností a vysokou mírou opakování, jako je tomu u pásových výrob, je v současnosti jednou z hlavních příčin vzniku nemocí z povolání. Tento problém se s očekávaným stárnutím populace ještě prohloubí. S přibývajícím věkem pracovních sil narůstá potřeba přizpůsobení pracovního prostředí a pracovních úkolů tak, aby odpovídaly jak fyzickým, tak i kognitivním schopnostem starších zaměstnanců. Toto přizpůsobení může zahrnovat snížení fyzické náročnosti pracovních úkonů, zajištění delších časů pro odpočinek a v neposlední řadě provedením ergonomických úprav.

Ergonomie je tedy jedním z klíčových prvků v boji proti nemocem z povolání a stává se nedílnou součástí moderního pracovního prostředí. Je nezbytné věnovat se jí, řešit problémy, které přináší, a neustále ji modernizovat skrze propojení s dalšími pokročilými technologiemi, jako je na příklad Motion Capture (MOCAP). Tímto způsobem lze usnadnit automatizaci ergonomických návrhů a analýz, které se dnes často dělají ručně, a tím zvýšit celkovou produktivitu, efektivnost a spokojenost. A to i v rámci čím dál více začleňovaných nástrojů virtuální a rozšířené reality a přístupům průmyslu 4.0.

1 Ergonomie

Ergonomie, název je odvozen z řeckých slov "ergon" (práce) a "nomos" (zákon), je interdisciplinární vědní obor, který využívá poznatky z technických i humanitních věd, včetně biomechaniky, fyziologie, hygieny a normování. Tato disciplína se zabývá vztahem mezi člověkem a jeho pracovním prostředím, přičemž klade důraz na přizpůsobení pracovních podmínek smyslovým, psychickým a fyzickým schopnostem člověka. Hlavním cílem ergonomie je zlepšit pracovní podmínky tak, aby byly v souladu s potřebami a možnostmi pracovníků, což vede k lepšímu komfortu, snížení nebezpečí nemocí z povolání a zvýšení produktivity. [19]

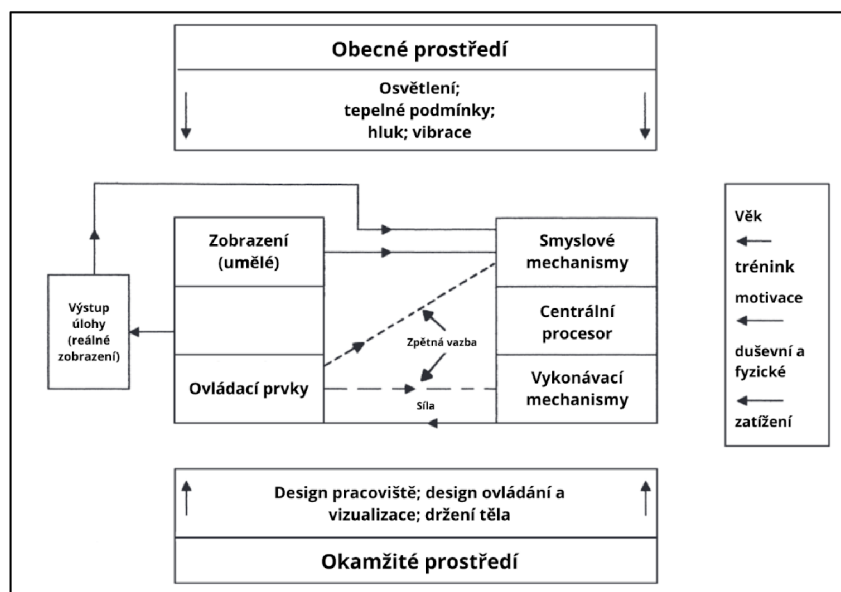
Definice ergonomie podle Mezinárodní asociace pro ergonomii (IEA) z roku 2000:

„Ergonomie je vědecká disciplína, která se zabývá vztahy mezi člověkem a ostatními prvky systému a využívá poznatků, údajů a metod k takovému řešení, aby bylo dosaženo optimální pohody člověka a výkonnosti systému.“ [1]

Dle normy ČSN EN 614-1:2006+A1:2009 definice ergonomie:

„Ergonomie se zabývá studiem vzájemných vztahů (interakcí) mezi lidmi a dalšími prvky systému. Ergonomie aplikuje teoretické poznatky, zásady, empirická data a metody pro navrhování zaměřené na optimalizaci pohody osob a celkovou výkonnost systému.“

Na **Obrázek 1.1** je zachycen systém pracovního prostředí s možnými faktory, které jej definují.



Obrázek 1.1 Schéma ergonomického systému [1]

Nezanedbatelný přínos ergonomie je v prevenci pracovních onemocnění. Správné ergonomické řešení může výrazně snížit výskyt tzv. muskuloskeletálních poruch (MSD). Tyto poruchy, zahrnující širokou škálu onemocnění nervů, svalů, šlach a opěrných nosných struktur, jako jsou meziobratlové ploténky, se mohou lišit v závažnosti a rozsahu obtíží. V nejhorším případě mohou vést k dlouhodobým a vážným zdravotním problémům.

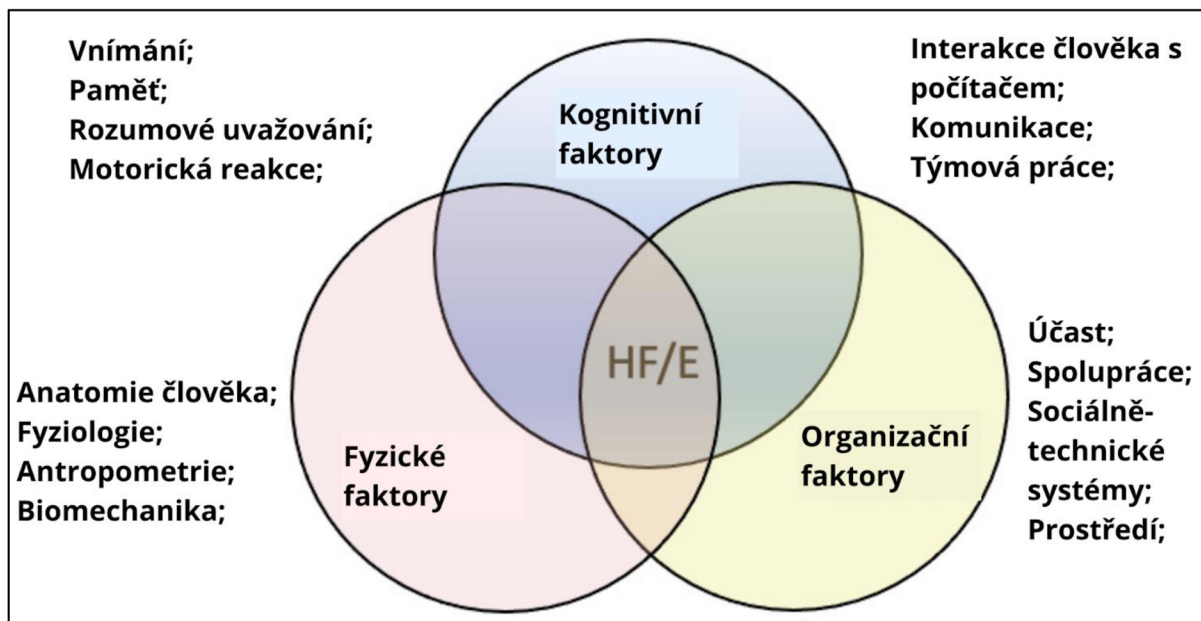
Ergonomie tedy představuje klíčový prvek v prevenci pracovních onemocnění a zlepšení kvality pracovního života. Její principy a aplikace jsou nezbytné pro vytváření zdravého a produktivního pracovního prostředí, které respektuje a naplňuje fyzické a psychické potřeby pracovníků.

1.1 Zaměření ergonomie

Ergonomie je rozmanitý a komplexní obor, který se zabývá mnohem více oblastmi než jen fyzickým uspořádáním pracovního místa. Tento obor se dotýká široké škály aspektů, od psychologické pohody včetně mentální zátěže a pracovní morálky až po technologickou interakci jako je ergonomie softwaru, přístupnost a uživatelská přívětivost technologických zařízení. Mimo to ergonomie také zahrnuje otázky související s pracovním prostředím, jako je akustika, kvalita vzduchu, osvětlení, ergonomie veřejných prostor a dopravy. Uvedené příklady představují jen některé z mnoha oblastí, do kterých ergonomie zasahuje, a existuje mnoho dalších oblastí, kde může mít významný dopad (*Obrázek 1.1.1*).

Základní podkategorie ergonomie podle IEA [1]:

- **Fyzická ergonomie:** Tato oblast se zabývá dopadem pracovního prostředí na zdraví člověka, využívající znalosti z oblastí jako anatomie, antropometrie, fyziologie a biomechaniky. Zabývá se otázkami jako jsou vhodné pracovní pozice, manipulace s těžkými předměty, opakované pracovní činnosti, profesní onemocnění, organizace pracovního místa a bezpečnostní aspekty práce.
- **Kognitivní ergonomie:** Tato podkategorie se soustředí na mentální a psychologické aspekty lidské práce. Zahrnuje témata jako jsou paměťové procesy, rozhodovací mechanismy, mentální zátěž, aspekty pracovního stresu a interakce mezi člověkem a počítačem / strojem co se týče ovladačů a sledovačů na zařízeních.
- **Organizační ergonomie:** Zaměřuje se na optimalizaci sociotechnických systémů, včetně organizačních struktur, pravidel a procesů. Tato oblast se věnuje efektivní komunikaci, správě zdrojů, managementu, týmové práci, organizaci pracovní doby a aspektům práce na dálku a dalším souvisejícím tématům.



Obrázek 1.1.1 Hlavní podoblasti ergonomie [1]

Tato bakalářská práce v rámci své náplně bude zacílena na fyzickou ergonomii a analýzu pohybu člověka.

Práce v sedě: Sedavá práce je charakteristická dlouhodobým sezením u pracovního stolu nebo před počítačem. Ergonomie v této oblasti se zaměřuje na správné uspořádání pracovní stanice, výběr ergonomického sezení, nastavení výšky stolu a monitoru, a doporučení pro pravidelné přestávky a protahování.

Práce ve stoje: Pro práci, která se vykonává ve stoje, ergonomie klade důraz na správnou výšku pracovní plochy, podporu polohy, vhodnou obuv a možnost občasného sezení nebo opření.

Práce s manuálním zatížením: Zahrnuje činnosti, kde je potřeba manipulace s břemeny a použití nástrojů. V tomto kontextu ergonomie zkoumá metody pro snížení fyzické námahy, jako je mechanizace práce, použití pomůcek pro snížení zátěže a trénink správných zvedacích technik.

Dynamická práce: Odkazuje na práci, která zahrnuje pohyb po celé pracovišti nebo mimo něj, jako je chůze, běh nebo jiné fyzické aktivity. Ergonomie se zde soustředí na optimalizaci pracovního prostředí pro snadný pohyb, vhodnou pracovní obuv a oblečení, a strategie pro rozložení zátěže.

Vysoce repetitivní práce: Práce vyžadující opakování stejných pohybů nebo postupů s vysokým počtem opakování. Ergonomická opatření zde směřují k alternaci úkolů, minimalizaci nezbytných repetitivních pohybů a zavedení pomůcek či automatizace k snížení opakování.

Práce v nucených polohách: Některé pracovní úkoly vyžadují práci v nepřirozených nebo nucených polohách, jako je sklonění, předklon, práce nad hlavou nebo v kleče. Ergonomie v této oblasti se snaží o redesign pracovních postupů, přizpůsobení pracovního prostoru a zavedení vhodných pracovních stanic a pomůcek pro snížení zátěže na tělo.

1.2 Aplikace ergonomie v praxi

Zákoník práce ukládá zaměstnavatelům povinnost vytvořit bezpečné pracovní prostředí, chránit zdraví zaměstnanců před riziky a minimalizovat nebezpečné faktory v práci. To zahrnuje identifikaci a hodnocení rizik, vedení dokumentace o těchto rizicích a opatřeních, a přizpůsobení pracovních podmínek. Zaměstnavatelé musí nahrazovat náročné práce novými postupy a zajistit, že se předchází nemocem z povolání. Jejich další povinností je pravidelné roční kontroly bezpečnosti a zdraví na pracovišti, s cílem identifikovat a odstranit nedostatky ve spolupráci s odborovými organizacemi a zástupci zaměstnanců. Zaměstnanci mají povinnost účastnit se školení o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci, která organizuje zaměstnavatel, a prokázat získané znalosti. [21]

V České republice dohlíží na dodržování pravidel bezpečnosti a ochrany zdraví při práci Státní úřad inspekce práce (SÚIP) prostřednictvím inspektorátů práce. Ti provádějí kontroly, zda zaměstnavatelé a zaměstnanci splňují příslušné zákonné povinnosti, a v případě nedostatků mohou udělovat pokuty nebo nařizovat nápravná opatření.

Ergonomie v průmyslovém prostředí hraje klíčovou roli ve snižování rizik spojených s pracovním prostředím, přičemž důraz je kladen na design pracovišť tak, aby se minimalizovala potřeba ohýbání, dosahování a opakování stejných pohybů, což vede ke snížení fyzické námahy. Toto uspořádání pracovních stanic přispívá ke snížení celkové svalové zátěže, která ovlivňuje celé tělo, a také k omezení lokální svalové zátěže, jež se týká konkrétních svalových skupin vystavených nadměrnému namáhání. [10]

Optimalizace pracovních poloh a pozic je dalším důležitým faktorem, který zabraňuje nesprávným držení těla a podporuje zdravější a bezpečnější pracovní prostředí. Ergonomický přístup zahrnuje také pravidelná školení zaměstnanců, která se zaměřují na výuku ergonomických technik a bezpečných postupů práce. K tomuto účelu bude možnost využít aplikaci, vytvořenou v rámci této práce.

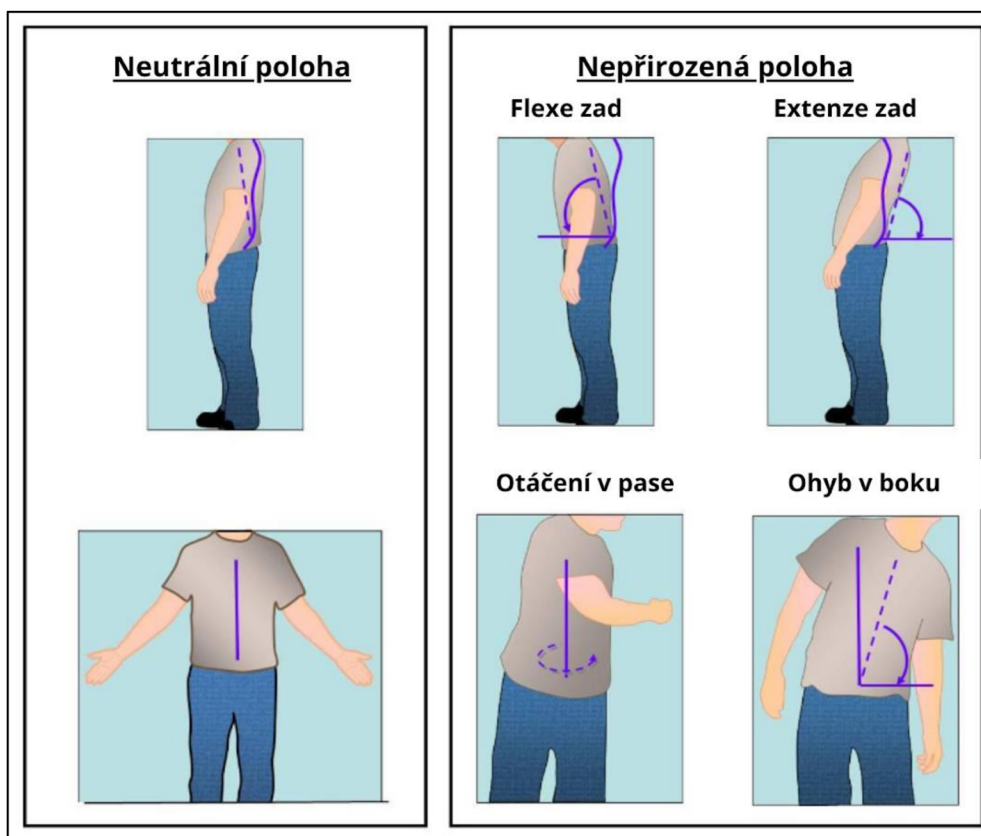
Celkově ergonomie v praxi představuje integraci principů zdravého a bezpečného pracovního prostředí do různých sektorů, což vede k lepší produktivitě, snížení zdravotních rizik a zvýšení spokojenosti zaměstnanců a uživatelů produktu. Základní ergonomické principy a důležité faktory při návrhu pracoviště jsou přiblíženy v následujících podkapitolách.

1.2.1 Základní ergonomické principy

Jednotlivé principy ergonomie, které by měly být aplikovány s cílem vytvořit optimální pracovní prostředí pro všechny zaměstnance. Nejzákladnějším principem je práce v neutrální poloze. Neutrální pozice je stav, kdy svaly a klouby jsou v klidové, přirozené poloze a nevyžaduje nadměrné natahování, ohýbání anebo torzi částí těla. Neutrální pozice minimalizuje stres a napětí na svalový a kosterní systém, tato pozice umožňuje maximální kontrolu a sílu pohybu, zatímco snižuje riziko únavy a poruch pohybového aparátu. Práce v neutrální pozici je efektivnější a bezpečnější, protože svaly pracují efektivněji a jsou méně vystaveny riziku zranění. [2]

Principy, které vycházejí z aplikace neutrální pozice a z metod ergonomických analýz:

- **Rovná záda:** Vyvarování se nadměrnému ohýbání nebo torzi páteře (*Obrázek 1.2.1.1*).
- **Vyrovnání hlavy a krku:** Udržování v přímé poloze v souladu s trupem.
- **Uvolněná ramena:** Udržování v uvolněném stavu, bez zvedání nebo napínání.
- **Připažené ruce:** Udržování rukou v blízkosti těla.
- **Vyrovnání předloktí:** Zajištění, že předloktí výrazně nevybočuje vně ani skrz střed trupu.
- **Uvolněné zápěstí:** Vyvarování se nadměrnému ohýbání a torzi zápěstí.
- **Podpora rukou a nohou:** Umožnění alespoň částečné podpory rukou a nohou.
- **Pravidelná obměna polohy:** Zamezení udržování pracovní pozice staticky po delší dobu.
- **Práce s přiměřeně těžkým břemenem:** Vyvarování se práci s nadměrným břemenem.



Obrázek 1.2.1.1 Neutrální a nepřirozená pozice zad [2]

1.2.2 Významné faktory při návrhu pracoviště

Ergonomicky dobře navržená pracoviště pozitivně ovlivňují výkon zaměstnanců, přispívají k redukci počtu úrazů a zvyšují celkovou efektivitu práce. Klíčovým principem při vytváření ideálního pracovního místa je eliminace všech negativních, rušivých a obtěžujících faktorů, čímž se vytvářejí podmínky pro maximální pracovní komfort. Tento proces zahrnuje široké spektrum technik a přístupů, přičemž při designu pracoviště je nutné zohlednit řadu faktorů. [20]

Zajištění dostatku volného prostoru: Umožnění efektivního pohybu a flexibilního uspořádání podle potřeb práce a individuálních fyziologických charakteristik pracovníka. Lze předejít nepřírozeným polohám a kontaktu těla s tvrdými a ostrými hranami.

Uspořádání pracovního místa: Všechny potřebné nástroje a vybavení by měly být umístěny v dosahu a na úrovni, která nevyžaduje nadměrné natahování nebo ohýbání. V ideálním případě by člověk měl být schopen pracovat s lokty u těla.

Práce ve správné výšce: Snaha provádět úkony ve vertikální úrovni mezi středem stehen a rameny a blízko těla.

Snížení užití nadměrné síly a nadměrných pohybů: Odlehčení břemene použitím vhodných nástrojů, zařízení, vozíků, použitím větší svalové skupiny, požádání pomoci od kolegů.

Snížení statické únavy svalů: Používání svorek a přípravků pro ulehčení ručního polohování.

Údržba příjemného prostředí: Ochrana při extrémních teplotách, omezení vibrací a hluku nebo omezení jejich expozice a zajištění správného umístění dostatečného osvětlení.

Minimalizace tlakových bodů: Co možné snížení stykových bodů tvrdých ploch nástroje a uživatele. Použití polstrovaného náradí a zařízení s ergonomicky navrženými rukojetmi pro snížení tlaku na ruce a zlepšení úchopu.

Obměna práce, časté střídání poloh, dostatečná hydratace, udržování kondice: Zavedení rotace úkolů mezi pracovníky pro snížení monotónnosti a distribuci fyzické zátěže. Podpora aktivních přestávek s cvičeními zaměřenými na zlepšení flexibility a síly. Zajištění snadného přístupu k pitné vodě a motivace k pravidelné hydrataci. Nabídka programů pro fyzické cvičení nebo slev na členství ve fitness centrech pro podporu celkové fyzické kondice pracovníků.

Přizpůsobení pracovního místa individuálním potřebám: Individuální hodnocení ergonomických potřeb pracovníků pro zajištění optimální podpory a komfortu, zahrnující nastavení pracovního místa podle osobních zdravotních omezení nebo zvláštních potřeb.

1.3 Metody a techniky ergonomické analýzy pracovní polohy

Hodnocení zdravotních rizik spojených s pracovní polohou se provádí u pracovníků, kteří vykonávají dlouhodobé nebo opakované činnosti, a jsou omezení ve výběru své pracovní polohy faktory jako jsou design strojů, uspořádání pracovního prostoru a specifika vykonávané práce. Pracovní pozice jsou určeny jak objektivními aspekty, tak subjektivními faktory, jako jsou tělesné proporce pracovníka. [23]

Ergonomická analýza slouží k identifikaci faktorů ovlivňujících jedince během práce v konkrétním pracovním prostoru a pod specifickými podmínkami. Jejím úkolem je rozpoznat specifika pracovního místa, analyzovat je a vypracovat odpovídající opatření – ať už technická, organizační, či systémová – která zajistí, že práce bude co nejlépe odpovídat jak osobním schopnostem zaměstnanců, tak i kritériím pro maximální efektivitu. [22]

Mezi základní metody používané v ergonomické analýze patří:

- **Rozhovory s pracovníky:** Zde se získávají informace o pracovních postupech, zátěži a možných problémech přímo od zaměstnanců.
- **Pozorování pracovních činností:** Tato metoda zahrnuje monitorování a záznam pracovních postupů a pohybů pro identifikaci ergonomických nedostatků. Používají se ergonomické checklisty a pro detailní analýzu zátěže specifické metody jako Rapid Upper Limb Assessment (RULA) a Rapid Entire Body Assessment (REBA). Podpůrné nástroje zahrnují videozáznamy, fotografie, pracovní návodky a dokumentaci.
- **Ergonomické Simulace:** Pro návrh pracovních prostorů a simulaci aktivit se využívají softwarové aplikace. Tyto simulace pomáhají analyzovat pracovní polohy a zatížení svalů a kloubů, čímž přispívají k prevenci úrazů. K získání dat pro ergonomické simulace se často využívá technologie MOCAP.
- **Dotazníky v kognitivní ergonomii:** Aplikují se pro hodnocení pracovní spokojenosti, úrovně stresu a dalších psychosociálních faktorů.

K včasnému rozpoznání ergonomických rizik se využívá řada nástrojů a metod, z nichž některé jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.

1.4 Prostředky k vyhodnocení ergonomické analýzy

Ergonomické checklisty představují nástroj v podobě jednoduchých tabulek s otázkami týkajícími se stavu pracoviště. Jsou vhodné pro orientační hodnocení již navržených míst. Checklisty jsou koncipovány tak, aby metodicky zkoumaly různé aspekty pracovního místa a činností, včetně uspořádání pracovní stanice, držení těla, manipulace s břemeny a používání nástrojů, a umožňovaly tak identifikaci potenciálních problémů. Otázky bývají ve formě kladných a záporných odpovědí, které rovnou napovídají o přijatelné a nepřijatelném řešení. Otázky mohou pokrývat řadu zásadních ergonomických faktorů, jako je nastavení sedadla, výška stolu, umístění monitoru, prostor pro nohy, osvětlení a úroveň hluku.[4]

Tyto checklisty jsou zastaralým a neefektivním přístupem, který je ale zakotven v legislativě, například česká legislativa je založena na NV 361/2007 a to je postaveno na manuálním principu formulářového záznamu a vyhodnocení pomocí kontrolních listů, tabulek a vzorců. Jejich zpracování je primárně navrženo pro potřeby kontrolních orgánů a expertů, což činí její použití pro laiky složité, zejména v rozlišení, co je v rámci předpisů akceptovatelné a co nikoliv.

Příkladem je kontrolní list (**Obrázek 1.4.1**) z materiálů Centra pracovního lékařství při Státním zdravotním ústavu ČR určený pro kontrolu kritérií ruční manipulace s materiálem [4]

Název práce: _____			
Datum: _____		Identifikace pracovního místa: _____	
Stanoviště: _____		Směnost: _____	
Kritéria	Rozsah	Změřeno	Přijatelný
A. Komfortní zóna spodní části	min. 56 cm	_____	ano – ne
B. Komfortní zóna horní části	max. 124 cm	_____	ano – ne
C. Optimální komfortní zóna spodní části	min. 84 cm	_____	ano – ne
D. Optimální komfortní zóna horní části	max. 97 cm	_____	ano – ne
E. Vzdálenost od těla (od středu k rukám)	max. 15 cm	_____	ano – ne

Obrázek 1.4.1 Checklist pro kritéria ruční manipulace s materiálem [4]

Tato práce otevírá nové možnosti pro zlepšení v oblasti ergonomické analýzy. Výstupní aplikace této práce přináší zlepšení v ergonomické analýze, překračující tradiční metody používání checklistů. Díky integraci moderní technologie MOCAP aplikace umožňuje digitální zobrazení pracovních poloh v jednotlivých momentech a jejich detailní ergonomické zhodnocení což umožňuje rychlou a efektivní identifikaci potenciálních ergonomických problémů a nedostatků. Na rozdíl od statických a časově náročných checklistů, naše aplikace nabízí interaktivní a uživatelsky přívětivé prostředí, které je přístupné i pro neodborníky.

1.4.1 Metoda RULA a REBA

Rapid Upper Limb Assessment (RULA) je snímkovací analytická metoda navržená speciálně pro pracovní prostředí, kde hlavní zátěž připadá na horní končetiny. RULA analyzuje biomechanické a posturální zátěže těla rozdělením na segmenty, umožňuje rychlou identifikaci nežádoucích pracovních pozic. Hodnocení se soustředí na polohy paží, předloktí, zápěstí, krku, trupu a zahrnuje i dolní končetiny. Začíná se stanovením základního skóre pro každou část těla na základě jejich polohy vzhledem k neutrální pozici, s postupným bodováním dle odchylek. K tomuto základnímu skóre mohou být dále přičteny body za specifické pohyby, jako jsou rotace nebo ohyby a také hmotnost manipulovaného břemene a vliv statické práce. Získané body za každou část těla, včetně dalších faktorů, se vkládají do tabulek pro výpočet celkového skóre. Toto skóre poté určuje úroveň rizika a nutnost přijetí opatření a náprav. [24]

Postup hodnocení s metodou RULA je přímočarý a metoda je efektivní a jednoduchá na použití. Kromě klasického ručního papírového vyplňování jsou dostupné i softwarová řešení pro rychlejší analýzu.

Postup analýzy:

1. **Výběr poloh k hodnocení:** Analyzují se různé polohy během celého pracovního cyklu. Každá poloha je hodnocena zvlášť, aby se získal přehled o různých fázích práce.
2. **Hodnocení poloh:** Každá pozorovaná poloha je hodnocena pomocí bodovacích tabulek, které zohledňují různé aspekty postury a jejich potenciální dopadu na tělo.
3. **Výpočet skóre a určení naléhavosti opatření:** Pro každou polohu je z tabulek vyčteno celkové skóre a na základě tohoto skóre se určuje naléhavost potřebných opatření, která jsou rozdělena do čtyř kategorií:
 1. kategorie (1–2): Práce je považována za přijatelnou, není vykonávána dlouhodobě.
 2. kategorie (3–4): Vyžaduje se další hodnocení, objevují se první požadavky na změny.
 3. kategorie (5–6): Změny jsou potřebné v nejbližší době.
 4. kategorie (7): Změny jsou velmi naléhavé a nezbytné.

Pravá strana:						
Pravé nadloktí						<input type="checkbox"/> Zvednuté rameno 1 <input type="checkbox"/> HK v abdukci 1 <input type="checkbox"/> Sklonění nebo podpora váhy paže -1
Pravé předloktí						<input type="checkbox"/> Činnosti přes střednici těla nebo na stranu 1
Pravé zápěstí						<input type="checkbox"/> Zápěstí vytočeno mimo střednici 1
Pravé zápěstí otočené			Síla & Zátěž pro pravou ruku VYBERTE JEDNU Z NABÍZENÝCH MOŽNOSTÍ: <input type="checkbox"/> Žádná překážka • méně než 2 kg přerušované zátěže nebo síly 0 <input type="checkbox"/> 2–10 kg přerušované zátěže nebo síly 1 <input type="checkbox"/> 2–10 kg statická zátěž • 2–10 kg opakující se zátěž nebo síla • 10 kg či více přerušované zátěže nebo síly 2 <input type="checkbox"/> 10 kg statická zátěž • 10 kg opakovaná zátěž nebo síla • náraz nebo prudké zvyšování síly 3			
Užití svalů	<input type="checkbox"/> Poloha převážně statická, např. držení více jak 1 min. nebo opakování více než 4krát za min. 1					

Obrázek 1.4.1.1 RULA – pravá ruka [6]

Kromě metody RULA, která se zaměřuje především na analýzu rizik spojených s horními končetinami, existuje také metoda REBA, známá jako Rapid Entire Body Assessment. Metoda REBA poskytuje komplexnější hodnocení celého těla, včetně dolních končetin, trupu a krku, což je zásadní pro práce, kde jsou rizika rozložena v různých částech těla. Tato metoda využívá systematický proces pro identifikaci biomechanických a posturálních zatížení na pracovišti, poskytující skóre, které reflektuje úroveň rizika spojeného s danou pracovní činností. [24]

1.4.2 Metoda OWAS

Metoda OWAS (Ovako Work Analysis System) je založena na pravidelném pozorování pracovníků a následném vyhodnocení získaných dat pomocí specifických indexů a hodnotících tabulek. Tato metoda se zaměřuje na identifikaci, zda je nutné provádět změny v pracovních polohách zaměstnanců, přičemž klade důraz na zjištění, které části těla (ruce, nohy, záda) jsou nadměrně zatíženy. Tato metoda rovněž bere v úvahu síly působící na osobu v konkrétní poloze. Hodnotí se na základě statického, dynamického a fyziologického hlediska, zjišťuje se, po jakou dobu je specifický postoj během pracovního dne pro pracovníka udržitelný. [7]

Proces použití metody OWAS probíhá ve třech krocích:

1. **Pozorování Pracovníků:** V intervalu 30 až 60 sekund se sledují vybraní pracovníci a zaznamenávají se jejich polohy a vynakládaná síla během reprezentativního období, například 40 minut.
2. **Časové Hodnocení:** Sledují se a zaznamenávají doby, po které pracovník zůstává v jednotlivých polohách.
3. **Indexace a Akční Indexy:** Polohám se přiřazují indexy z OWAS tabulek, na základě, kterých se určují akční indexy a doba trvání pohybu (**Obrázek 1.4.2.1**). To umožňuje identifikovat potřebu nápravných opatření pro eliminaci rizik spojených s pracovními polohami.

Význam hodnot:

- (bílá barva) žádné nápravné opatření,
- (žlutá barva) nápravná opatření v blízké budoucnosti,
- (zelená barva) nápravné opatření co nejdříve,
- (červená barva) okamžité nápravné opatření.

Záda-páteř	1 – přímý	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2 – ohnutý	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3
	3 – stočený	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
	4 – ohnutý a stočený		2	2	3	3	3	3	4	4	4
Ruce	1 – obě ruce pod úrovní ramen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2 – jedna ruka na nebo nad	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	3 – obě ruce na nebo nad	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3
Nohy	1 – sezení	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
	2 – stání s nataženýma nohama	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	3 – stání s jednou nataženou nohou	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3
	4 – obě kolena ohnuta	1-2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
	5 – jedno ohnuté koleno	1-2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
	6 – klečení	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
	7 – chození	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	Procento pracovní doby	0	20	40	60	80					

Obrázek 1.4.2.1 Tabulka časových vlivů pracovních pozic [25]

Metoda OWAS patří mezi nejběžněji používané techniky pro posuzování pracovních postojů a je integrována do několika softwarových řešení zaměřených na průmyslovou ergonomii. [25]

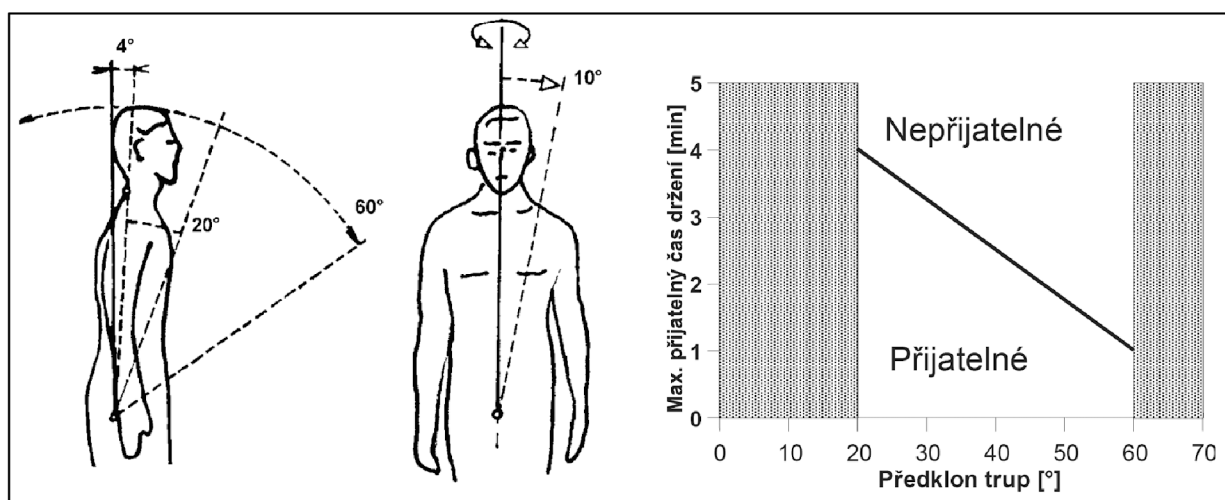
1.4.3 Hodnocení pracovních poloh dle legislativy ČR

Ergonomie práce se v České republice podrobuje řadě zákonů, předpisů a technických norem. Základním právním dokumentem v této oblasti je zákon o bezpečnosti práce, který stanovuje obecné požadavky pro bezpečnost a ochranu zdraví. Pod tento zákon spadá i nařízení vlády č. 361/2007 Sb., které podrobně pojednává také o hygienických limitech energetického výdeje při práci, měření a hodnocení lokální svalové zátěže a hodnocení pracovních poloh.

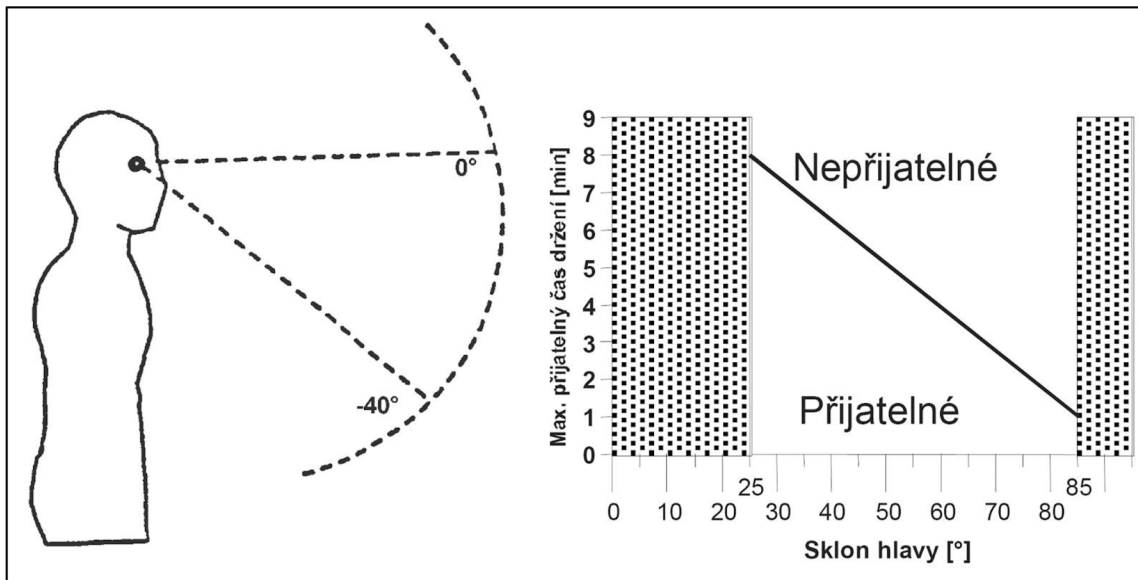
Pro kontext této práce je nejdůležitější částí Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. Část druhá – Rizikové faktory pracovních podmínek, jejich členění, zjišťování, hodnocení, zdravotního rizika a podmínky ochrany zdraví při práci, HLAVA IV – Podmínky ochrany zdraví při práci s fyzickou zátěží. Tato část nařízení vymezuje celkovou fyzickou zátěž, lokální svalovou zátěž a jejich hygienické limity a dále pracuje s pracovní polohou a ruční manipulací s břemenem a jejich hodnocení.

Hodnocení pracovní polohy z hlediska nařízení:

1. „Hodnocení zdravotního rizika pracovní polohy se provádí na základě jejího zařazení mezi přijatelnou, podmíněně přijatelnou a nepřijatelnou pracovní polohu.
2. Při hodnocení pracovní polohy se používá dvoukrokový systém. První krok zahrnuje hodnocení poloh jednotlivých částí těla podle úhlů, druhý krok určuje podmínky práce, za kterých lze pracovní polohu označenou v prvním kroku za podmíněně přijatelnou zařadit mezi pracovní polohu přijatelnou nebo pracovní polohu nepřijatelnou mezi pracovní polohu podmíněně přijatelnou.
3. Průměrný hygienický limit pro dobu práce v jednotlivých nepřijatelných pracovních polohách v průměrné osmihodinové směně je 30 minut. Doba trvání jednotlivých nepřijatelných pracovních poloh nesmí být delší než 1 až 8 minut v závislosti na typu pracovní polohy.
4. Průměrný hygienický limit pro dobu práce v jednotlivých podmíněně přijatelných pracovních polohách v průměrné osmihodinové směně je 160 minut. Doba trvání jednotlivých podmíněně přijatelných pracovních poloh pak nesmí být delší než 1 až 8 minut v závislosti na typu pracovní polohy.“ [8]



Obrázek 1.4.3.1 Hodnocení polohy trupu [8]



Obrázek 1.4.3.2 Hodnocení horní končetiny [8]

Hodnocení ruční manipulace s břemenem:

1. „Připustný hygienický limit pro hmotnost ručně manipulovaného břemene přenášeného mužem při občasném zvedání a přenášení je 50 kg, při častém zvedání a přenášení 30 kg. Při práci vsedě je připustný hygienický limit pro hmotnost ručně manipulovaného břemene mužem 5 kg.
2. Průměrný hygienický limit pro celosměnovou kumulativní hmotnost ručně manipulovaných břemen v průměrné osmihodinové směně mužem je 10000 kg.
3. Připustný hygienický limit pro hmotnost ručně manipulovaného břemene přenášeného ženou při občasném zvedání a přenášení je 20 kg, při častém zvedání a přenášení 15 kg. Při práci vsedě je připustný hygienický limit pro hmotnost ručně manipulovaného břemene ženou 3 kg.
4. Průměrný hygienický limit pro celosměnovou kumulativní hmotnost ručně manipulovaných břemen v průměrné osmihodinové směně ženou je 6500 kg.“ [8]

Ucelené tabulky spolu se všemi příslušnými obrázky v podobě, jaké jsou ilustrované na **Obrázek 1.4.3.1** a **Obrázek 1.4.3.2** pro konkrétní vyhodnocení poloh jednotlivých částí těla podle úhlů s podmínkami práce jsou uvedeny v přílohách spolu s tabulkami pro hodnocení ruční manipulace s břemeny se zohledněním pracovní polohy.

1.5 Digitalizace v ergonomii

Metody a analýzy v oblasti ergonomie, které byly dosud používány, spočívají v systematickém pozorování pracovníka při plnění úkolů kvalifikovaným pracovníkem spolu s definovanými hodnotícími tabulkami a checklisty. Tyto tradiční metody jsou výhodné pro jejich univerzální aplikovatelnost napříč různými pracovišti a poskytují standardizované limity pro pracovní expozici. Nicméně, tyto metody mohou být časově náročné a mohou podléhat subjektivnímu zkreslení. Často také nedostatečně zohledňují antropometrické charakteristiky jednotlivých pracovníků, a pozorovatel nemusí být schopen zachytit všechny možné pohyby pracovníků. [13]

Naopak, s nástupem digitálních technologií, jako jsou pokročilé senzory a Motion Capture systémy, se otevírají nové možnosti pro přesnější a efektivnější ergonomické hodnocení. Tyto digitální nástroje umožňují detailní a objektivní záznam pohybů, což výrazně zjednodušuje a zrychluje celý proces analýzy a zároveň přináší vyšší míru přesnosti a objektivnosti do ergonomického hodnocení pracovních postupů.

Stěžejní výhody digitální ergonomie [14]:

- **Předběžná vizualizace pracovního prostředí a pohybů pracovníka:** Digitální ergonomie umožňuje vytvořit virtuální model pracoviště a simulovat pohyby pracovníka při vykonávání různých úkolů.
- **Snadné porovnání různých variant a řešení:** Díky simulacím lze snadno porovnat různé varianty uspořádání pracoviště, nebo návrhu pracovních postupů z hlediska ergonomie a efektivity.
- **Včasná identifikace a náprava ergonomických rizik:** Digitální ergonomie umožňuje odhalit potenciální ergonomická rizika již v rané fázi návrhu, což usnadňuje jejich odstranění nebo minimalizaci ještě před zahájením výroby nebo realizací pracoviště.
- **Flexibilita a úspora nákladů:** Provádění změn v digitálním prostředí je mnohem rychlejší a levnější než úpravy fyzického pracoviště.

Jako příklad můžeme uvést analýzu pomocí metody RULA. Tradiční provádění této analýzy zabere přibližně 15 minut pro vyhodnocení jednoho postoje, zatímco s využitím softwaru je možné stejnou analýzu provést během několika minut. Podobné časové úspory nabízejí i další analýzy, jako jsou NIOSH nebo OWAS. [12]

Trend digitalizace tedy nevyhnul ani ergonomii a jeho výstupem je zástup sofistikovaných softwarů, které umožňují virtuální reprezentaci manuálních výrobních a montážních činností. Tyto programy jsou založeny na digitálních modelech člověka (Digital Human Model – DHM), které nabízejí bohaté možnosti přizpůsobení od vizuálních aspektů po antropometrické rozměry a rozsahy kloubů, aby digitální model co nejlépe popisoval reálného pracovníka pro co možná nejpřesnější ergonomickou simulaci.

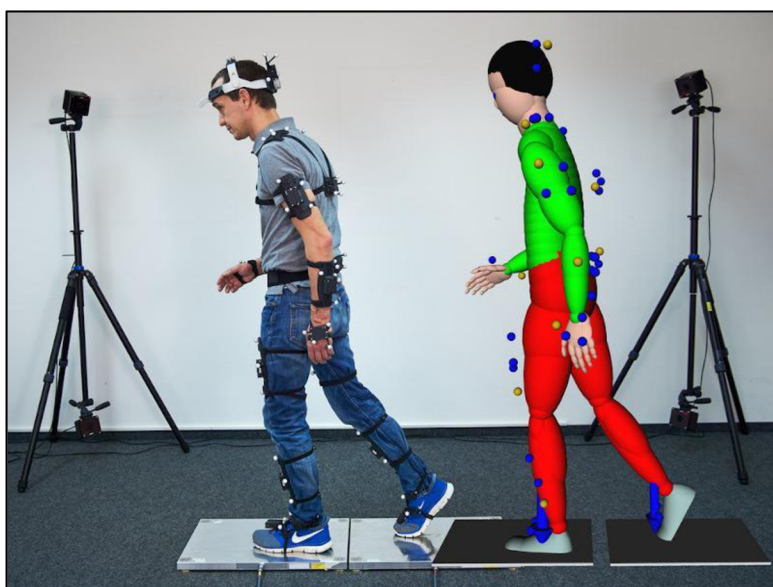
Tyto nástroje se využívají jak pro návrh nových, dosud neexistujících pracovišť a výrobních systémů, tak pro posuzování již existujících pracovišť a procesů.

2 MOCAP technologie

Motion Capture (MOCAP), neboli technologie záznamu pohybu, je proces, při kterém se reálný pohyb lidí, zvířat nebo objektů nahrává anebo převádí do digitální formy v reálném čase. Tato technologie eliminuje potřebu manuální animace nebo anotace digitálního pohybu, což je proces často náročný jak z hlediska času, tak dovedností a zároveň tato technologie otevírá nové možnosti interakce člověka s virtuálním prostředím.

Nejčastěji je MOCAP využíván ve filmovém a herním průmyslu, ale technologie si našla uplatnění také v řadě dalších oblastí, včetně medicíny, sportu, vojenství a strojírenství.

V oblasti strojírenství se MOCAP využívá zejména v kombinaci s programy digitální továrny, které byly zmíněny v kapitole o digitalizaci ergonomie. Kromě toho se v průmyslu začínají uplatňovat digitální, interaktivní návodky, které díky kombinaci technologií MOCAP a brýlí s rozšířenou realitou umožňují detailně a realisticky proškolovat personál bez nutnosti provádění reálných úkonů, čímž se předchází možným chybám vedoucím k reálným škodám.



Obrázek 2.1 Záznam Motion Capture [23]



Obrázek 2.2 Digitální, interaktivní návodka [24]

2.1 Typy MOCAP systémů

Komerčně dostupné MOCAP systémy se dělí do čtyř hlavních kategorií, které se liší ve způsobu záznamu pohybu.

Optické Systémy: Tyto systémy fungují na principu optického snímání. Používají se sady kamer rozmístěných kolem snímaného objektu, které opticky zaznamenávají pohyb markerů (značek) připevněných na objektu. Markery jsou obvykle stříbrné a reflektivní pro lepší kontrast na černém podkladu, těmto markerů říkáme pasivní, dále existují i markery aktivní, které přímo světlo vyzařují. Poloha markerů v digitálním 3D prostoru je poté určována pomocí triangulačních algoritmů. Existují i systémy kde použití markerů není potřeba pomocí technologie rozpoznání obrazu a pokročilých algoritmů. Optické systémy jsou známé pro svou vysokou přesnost a jsou široce používané.

Magnetické Systémy: Zde se poloha určuje měřením změn magnetického pole pomocí cívek umístěných na vysílači a přijímačích. Tyto systémy jsou ideální pro snímání pohybu v těsných prostorách, kde by optické systémy mohly mít problém se zakrytím markerů. Jejich nevýhodou je, že mohou být ovlivněny přítomností kovů v okolí. [15]

Mechanické Systémy: V tomto případě je aktér vybaven exoskeletem sestávajícím z mechanických komponent, jako jsou tyče a klouby. Poloha je určována pomocí potenciometrů umístěných v kloubech, které snímají natočení tyčí. Tyto systémy jsou cenově dostupnější a jednodušší na použití.

Inerciální Systémy: Tato kategorie využívá inerciální měřicí jednotky (IMU), které kombinují akcelerometry, gyroskopy a někdy i magnetometry. Senzory jsou připevněny přímo na tělo aktéra. Tento typ systému nevyžaduje vnější reference, což zmenšuje nároky na prostor. Nicméně mohou být náchylné k akumulaci chyb kvůli driftu, což je dělá méně přesnými než optické systémy. Doporučuje se proto jejich kombinované použití s jinými typy MOCAP systémů.



Obrázek 2.1.1 Exoskelet mechanického systému a senzory inerciálního systému [25]

2.2 Digitální model člověka

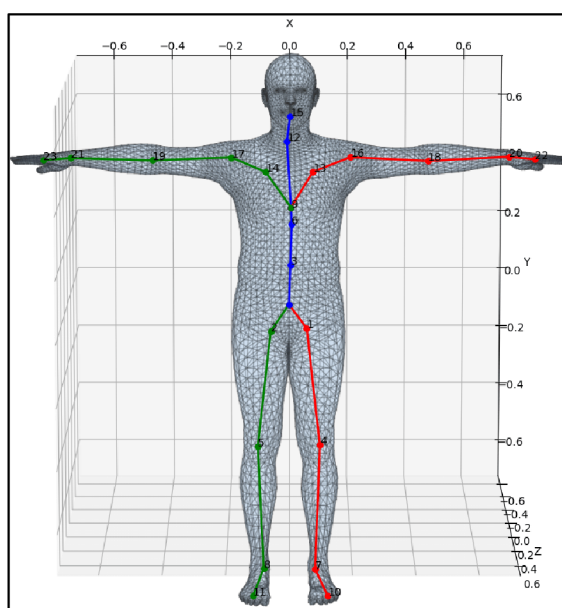
V kapitole věnované digitalizaci ergonomie se objevuje termín Digital Human Model (DHM), který je zásadním pojmem v rámci této práce. V této kapitole bych jej rád blíže rozebral.

Digital Human Model je sofistikovaná 3D digitální reprezentace člověka a jeho chování, díky které je možné v digitálním světě modelovat a analyzovat lidské aktivity. Aplikace DHM sahá od ergonomie, přes bezpečnost práce, design produktů, automobilový průmysl, až po návrh a optimalizaci pracovních stanic, vozidel a veřejných prostor, s cílem zlepšit komfort, efektivitu a bezpečnost uživatelů. DHM poskytuje návrhářům a inženýrům možnost vizualizace a analýzy interakcí lidí s produkty a systémy, což umožňuje hlubší porozumění potřebám a omezením uživatelů.

K dispozici jsou různá softwarová řešení pro práci s DHM, jako jsou například Jack a Delmia, která obvykle obsahují knihovny předpřipravených modelů člověka. Kromě toho existují i nástroje umožňující vytváření vlastních DHM, včetně parametrických generátorů pro snadnou a rychlou tvorbu lidských modelů nebo 3D grafických nástrojů poskytujících plnou tvůrčí svobodu.

2.2.1 Skeletální struktura DHM

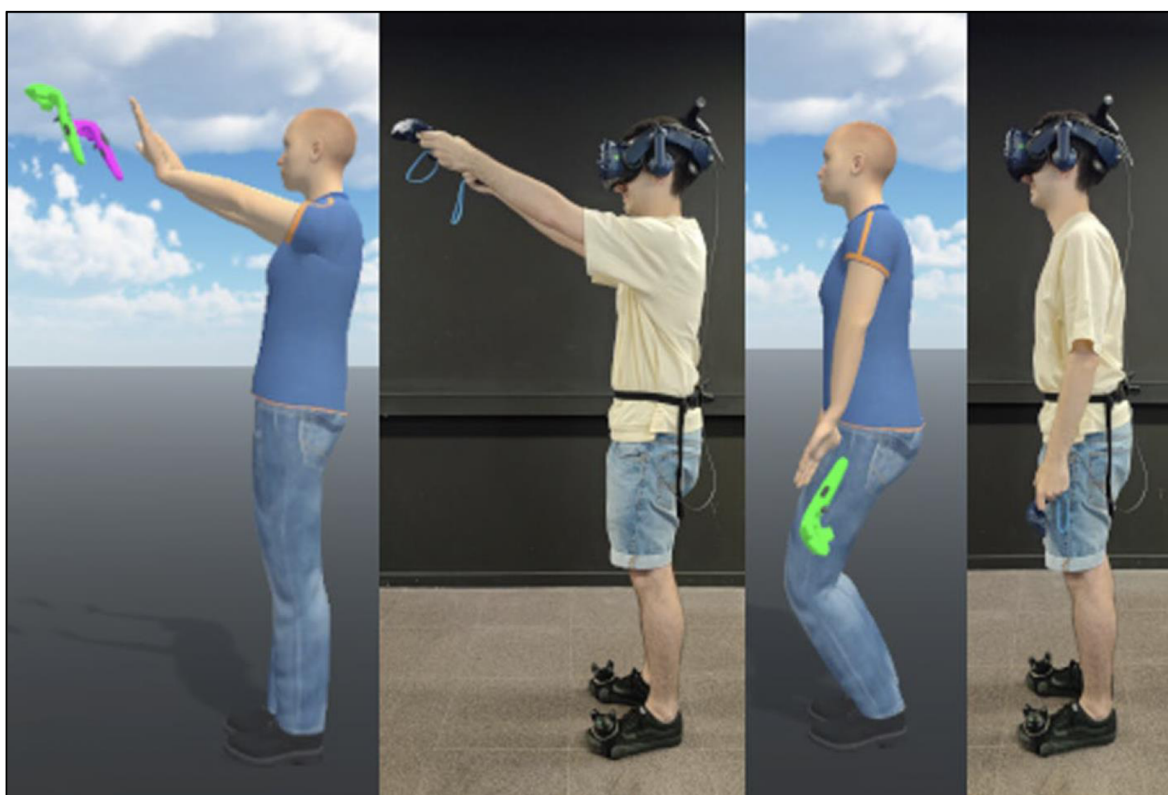
Klíčovým prvkem digitálního modelu člověka (DHM) je jeho skeletní model, který je zjednodušenou reprezentací lidské kostry. Tento model, ve spolupráci s kloubovými vazbami, simuluje biomechaniku lidských končetin a pohybů, což výrazně usnadňuje práci s modelem. Existují různé skeletální struktury, které se liší v úrovni detailů a schopnosti simulovat různé pohyby, od základních struktur s omezeným počtem kostí, jež umožňují pouze základní lidské pohyby, až po složité biomechanické modely. Tyto pokročilé modely reprezentují celý muskuloskeletální systém, včetně svalů, kloubů a kostí, a umožňují simulaci komplexních pohybů a provádění analýz, jako je rozložení sil, stres na jednotlivé části těla a biomechanická zátěž. Pro účely DHM se obvykle využívá model s 23 klouby, který poskytuje nezbytnou strukturu pro animaci a simulaci lidských pohybů. [17]



Obrázek 2.2.1.1 23 kloubový skeleton DHM [18]

2.2.2 Adaptační skeletu na různé tělesné typy

Pro přesnou digitalizaci lidské postavy je nezbytné zohlednit rozmanitost tělesných typů. Nesoulad mezi antropometrickými údaji digitálního modelu člověka (DHM) a skutečnými rozměry uživatele zaznamenanými systémem pohybového zachycení (MOCAP) může vést k vizuálním chybám (*Obrázek 2.2.2.1*) a narušení imerze do virtuální reality. Proto se používají různé techniky pro adaptaci kostry na míru každému uživateli, což je klíčovým prvkem pro zlepšení celkového zážitku ve virtuální realitě. Jednou z metod je automatické měření, které umožňuje rychlé a přesné přizpůsobení kostry avatara podle rozměrů uživatele bez nutnosti manuálního zásahu. Tento proces začíná sérií jednoduchých pohybů, které uživatel provede, a umožňuje systému zaznamenat klíčové rozměry a polohy kloubů. Adaptační avatara tímto způsobem výrazně redukuje nesrovnalosti, které mohou vzniknout při použití inverzní kinematiky (IK), ve srovnání s tradičními metodami založenými na univerzálním škálování podle výšky uživatele. [19]



Obrázek 2.2.2.1 Problém rozdílu tělesných proporcí uživatele a DHM [19]

3 Nástroj pro automatizované vyhodnocení ergonomické analýzy

V praktické části se zaměříme na observativní metodu využívající digitální záznam činnosti. Pozornost bude zaměřena především na analýzu a ergonomické hodnocení s využitím digitálního modelu člověka (DHM). Využit bude princip velice blízký ergonomické simulaci a 3D kinematické analýzy. Hlavní rozdíl spočívá v aplikaci reálných pohybů pracovníka získaných observativním způsobem s využitím technických prostředků (HW a SW) pro digitalizaci a záznam pohybu – Motion Capture.

Výstupem práce je vytvořit aplikaci (3D přehrávač) pro vizualizaci polohy těla na základě observativního záznamu pohybu markerů MOCAP. Vizualizována bude celková postava a samostatně jednotlivé segmenty těla s hodnocením pracovní polohy dle ergonomického posouzení.

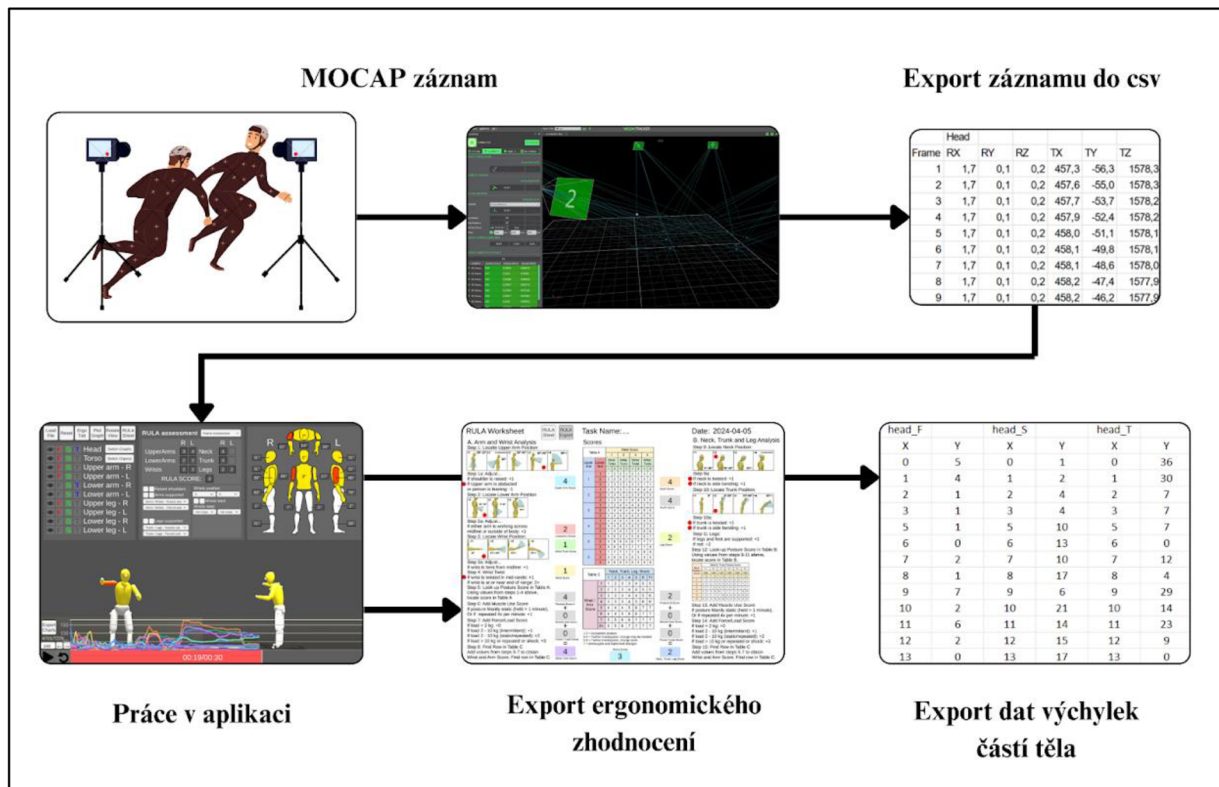
Výstupy této aplikace nebudou podkladem pro jednání s kontrolními orgány v oblasti ergonomie. Hlavním účelem aplikace je ergonomická analýza pro zaznamenanou pracovní činnost.

Práce se zaměřuje na následující klíčové činnosti a procesy:

- Vstupní MOCAP záznam v požadovaném CSV formátu.
- Výběr a načtení požadovaného záznamu.
- Obecný skeleton (DHM) zjednodušený dle dat.
- Mapování značek na skeleton a rozhýbání DHM.
- Ergonomické hodnocení polohy DHM.
- Vizualizace polohy hodnocených segmentů DHM s ergonomickým hodnocením.

3.1 Schematická struktura analýzy MOCAP záznamu s aplikací

Před samotným použitím aplikace, která je výsledkem této práce, je nutné provést několik kroků mimo aplikaci, které jsou nezbytné pro získání dat ve vhodném formátu a pro následnou analýzu pracovního úkonu. Prvním krokem je záznam pracovního úkonu, který chceme analyzovat. Tento záznam je potřeba provést pomocí MOCAP systému a dle specifických požadavků, které jsou podrobněji popsány v následující kapitole o pořízení MOCAP záznamu.



Obrázek 3.1.1 Schéma analýzy pracovní polohy s aplikací

3.2 Pořízení MOCAP záznamu

Testovací záznamy byly pořízeny v laboratoři analýzy pohybu a ergonomie na Technické univerzitě v Liberci a bylo využito optické systému MOCAP.

3.2.1 Komponenty optického MOCAP systému Vicon

Při záznamu dat pro aplikaci byl využit optický systém Vicon, který patří mezi profesionální sady MOCAP a je považován za jednu z předních značek v oboru. Díky své schopnosti detailně a s vysokou přesností zachytit složité pohyby v reálném čase je široce používán ve filmovém a herním průmyslu, stejně jako ve vědeckých studiích zaměřených na pohybové analýzy, biomechaniku a ergonomii.

Pro ergonomickou analýzu je systém vybaven kamerami Vero v2.2, markery, kalibrační tyčí Active Wand, Lock Sync Box a doprovodným softwarem Tracker. Konkrétní komponenty se mohou lišit v závislosti na zamýšleném použití; pro dynamická prostředí a zábavní průmysl se častěji používají kamery Valkyrie a software Shōgun, zatímco v oblasti sportu a analýzy chůze se upřednostňuje software Nexus.

Kamera Vero v2.2: zachytává infračervené spektrum v rozlišení 2048x1088 s frekvencí snímání až 330 Hz, což odpovídá snímku každé tři tisícině sekundy. Díky této vysoké frekvenci je systém schopen zpracovávat pohyby rychle se pohybujících objektů, jako jsou drony nebo sportovci.



Obrázek 3.2.1.1 Kamera Vero v2.2 [26]

Reflexní markery a tagy: Markery jsou malé stříbrné reflexivní kuličky, které se rozsvítí při dopadu světla z kamerového systému díky svému reflexnímu povrchu. Toto rozsvícení umožňuje kamerám snadnou detekci a sledování jejich pohybu v prostoru. Reflexní markery mohou být umístěny na plastovém dílu v unikátním uspořádání, čímž tvoří jeden tag, který představuje jeden sledovaný bod. Tyto tagy mohou obsahovat více dat, než jsou pouze informace o pozici, včetně orientace a identity objektu.

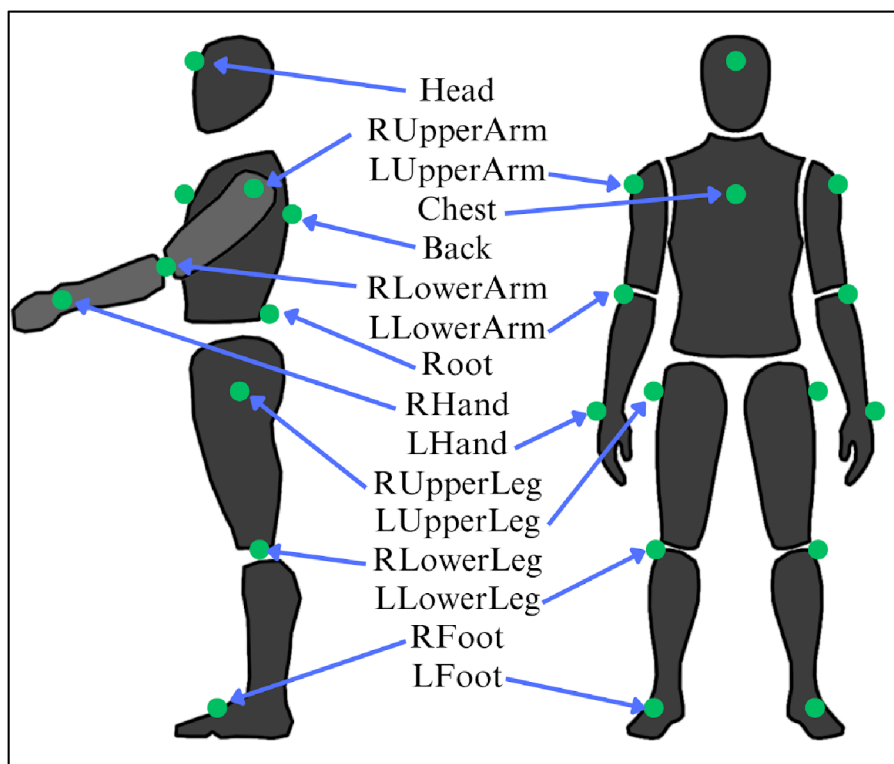
Active Wand: Tento nástroj od firmy Vicon slouží ke kalibraci systémů pro sledování pohybu. Je využíván pro přesné nastavení kamer, aby správně zachytily prostor pro sledování pohybu. Active Wand obsahuje markery, které jsou pro kamery snadno detekovatelné a pomáhají tak vytvořit přesný model sledovaného prostoru. Kalibrace pomocí tohoto nástroje je klíčová pro přesné měření pohybu.

Lock Sync Box: Toto zařízení slouží k synchronizaci systému Vicon se zařízeními třetích stran v rámci komplexních setupů, čímž zajišťuje konzistenci dat.

Tracker: Tracker je softwarový nástroj od Vicon pro zachytávání pohybu, který se používá v široké škále aplikací od robotiky po lidské faktory, optimalizaci designu, virtuální inženýrství, previzualizaci a sledování dronů. Nabízí intuitivní a funkční rozhraní pro sběr dat v reálném čase.

3.2.2 Pořízení záznamu

Testovací záznamy, které byly využity při tvorbě aplikace, pořídil Ing. Jan Vavruška, Ph.D. pomocí systému Vicon, jenž byl popsán v předchozí kapitole. Během záznamu bylo rozmístění tagů na aktérovi a jejich pojmenování v doprovodném zaznamenávacím software Vicon Tracker 3.X takové, jak je znázorněno na **Obrázek 3.2.2.1**. Funkce aplikace vycházejí právě z tohoto rozmístění a pojmenování tagů, což je pro zpracování úkonů aplikací zásadní. Přesnost pojmenování tagů je nezbytná a umístění tagů by mělo být strukturně zachováno pro dosažení dostatečně přesného vyhodnocení.

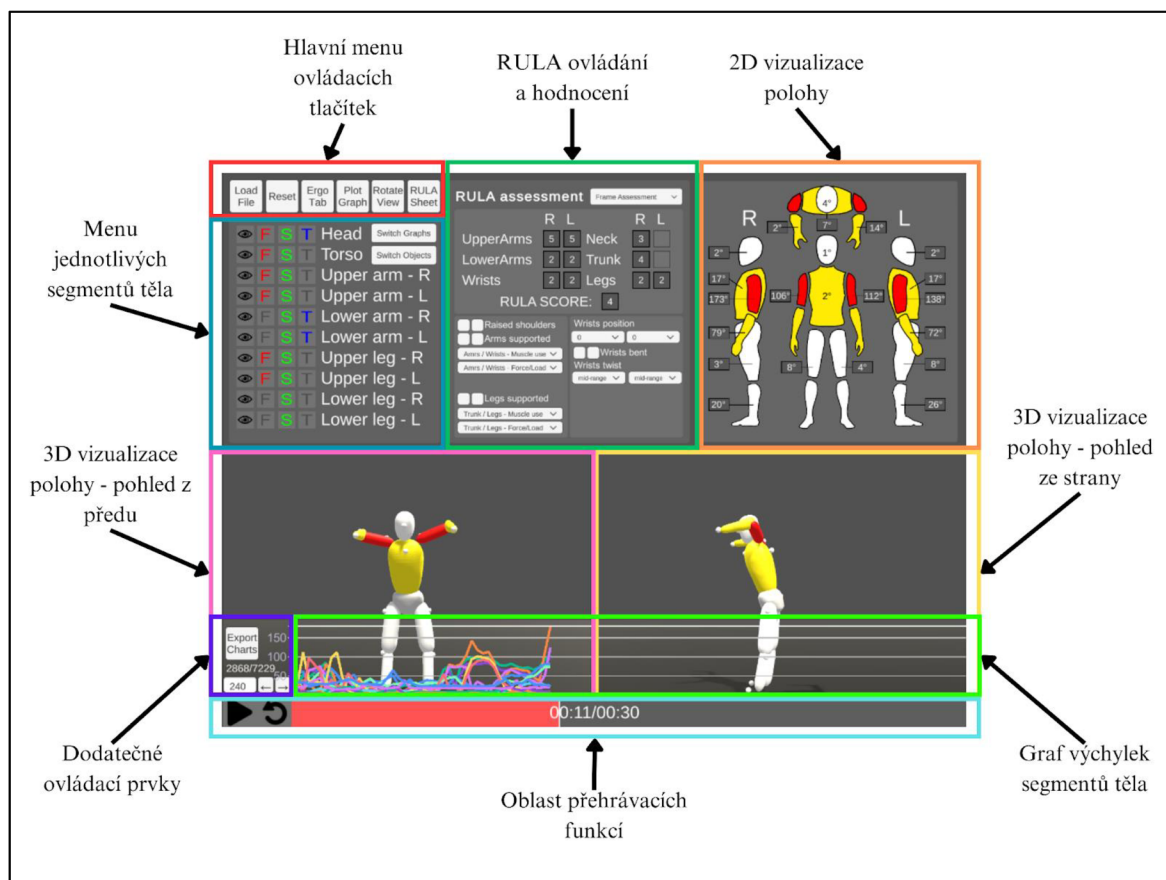


Obrázek 3.2.2.1 Rozmístění a pojmenování tagů

Tato jednoduchá konfigurace však neumožňuje měření detailních pohybů zápěstí a jednotlivých prstů. Pro správnou ergonomickou evaluaci pomocí metody RULA jsou tyto údaje vyplňovány manuálně přímo v aplikaci.

Po nahrání úkonů byly nahrávky exportovány z programu Vicon Tracker ve formátu CSV, který měl být implementován do aplikace, jak je popsáno v kapitole 3.5.

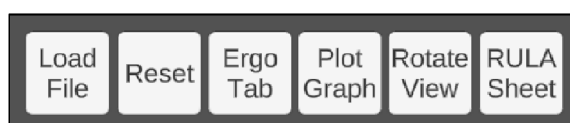
3.3 Orientace a popis základních prvků v uživatelského rozhraní aplikace



Obrázek 3.3.1 Popis uživatelského prostředí aplikace

Hlavní menu ovládacích tlačítek:

- **Load File:** Otevření systémového prohlížeče souborů pro načtení CSV souboru vybraného pro analýzu.
- **Reset:** Resetuje všechny hodnoty a načtené soubory. Aplikace je připravena na načtení nového souboru.
- **Ergo Tab:** Původní okno 3D vizualizace rozdělené napůl. V horní polovině se otevírají panely: ovládání RULA, 2D vizualizace a menu jednotlivých segmentů těla. Dolní polovinu zaujímá okno 3D vizualizace.
- **Plot Graph:** Zobrazí nebo skryje graf výchylek segmentů těla.
- **Rotate View:** Přepíná okno 3D vizualizace mezi módy: dva pohledy zepředu a ze strany, a jedním pohledem, který lze otáčet kolem DHM pomocí tažení myši.
- **RULA Sheet:** Zobrazí a skryje podrobný RULA list vyhodnocení, který lze následně exportovat pomocí nově zobrazeného tlačítka “RULA Export” v systémovém prohlížeči souborů.



Obrázek 3.3.2 Hlavní menu

RULA ovládání a hodnocení: Panel umožňuje přepínat mezi klasickým snímkovým a sekvenčním hodnocením RULA, doplňovat proměnné potřebné pro RULA zhodnocení, které nelze vyměřit z načteného CSV souboru, a odečítat částečné RULA skóre pro jednotlivé části těla a celkové RULA skóre. Detailnější vysvětlení je obsaženo v kapitole o "Hodnocení pracovní polohy dle ergonomického posouzení".

2D vizualizace polohy: Vizualizace polohy 2D panákem ve třech základních rovinách lidského těla (frontální, sagitální, transversální) se zobrazením úhlových výchylek jednotlivých segmentů těla v příslušných rovinách.

Menu jednotlivých segmentů těla: Panel segmentů těla, kde pro každý segment je tlačítko umožňující skrýt a zpětně zobrazit 3D model (tlačítko s ikonou oka), skrýt a zobrazit čáru v grafu pro příslušnou výchylku v příslušné rovině (tlačítka F-Frontální, S-Sagitální, T-Transverzální). Pro zvýšení přívětivosti jsou v panelu tlačítka "Switch Objects" pro hromadné negování aktuálního skrytí/zobrazení objektu a "Switch Graphs" pro stejnou funkci s grafy.



Obrázek 3.3.3 Ukázka tlačítek

3D vizualizace polohy: Okno pro digitální 3D reprezentaci polohy. Tlačítkem "Rotate View" v hlavním menu lze přepínat mezi dvěma módy zobrazení: zafixovaným zobrazením zepředu a ze strany a módem otáčení kolem modelu tažením myši.

Graf výchylek segmentů těla: Část okna aplikace, kde se do grafu vykreslují výchylky segmentů těla od neutrálních poloh ve stupních a čase. Pro komfortnější čtení hodnot je možné graf roztažením vrchu grafu myší zvětšit.

Oblast ovládání přehrávacích funkcí: V této části lze spouštět a zastavovat sekvenci, zapínat a vypínat opakované přehrávání sekvence ve smyčce a přetáčet sekvenci do určité části tažením posuvníku myši. U posuvníku je zobrazen aktuální přehraný čas sekvence a celková délka sekvence.

Dodatečné ovládací prvky: Zde lze najít zadávací pole pro rychlost přehrávání sekvence z načteného CSV souboru, s výchozí hodnotou 240 snímků za sekundu. Dvě tlačítka ← a → umožňují posun aktuálního snímku buď o 10 snímků dopředu, nebo dozadu. Je zobrazen počet aktuálně vykresleného snímku a celkový počet snímků sekvence. Tlačítko "Export Charts", které umožňuje otevřít systémový prohlížeč pro uložení CSV souboru s daty z grafu výchylek, je dostupné pouze tehdy, jsou-li zobrazeny grafy, v opačném případě je tlačítko spolu s grafy skryto.

3.4 Výběr vhodných nástrojů pro tvorbu aplikace

Při výběru hlavního nástroje pro tvorbu aplikace bylo zapotřebí zvážit několik kritérií pro vyhodnocení aplikovatelnosti vývoje.

- Nástroje pro práci s 3D grafikou
- Nástroje pro práci s MOCAP technologií
- Cena a dostupnost
- Dokumentace
- Ekosystém

Pro vývoj aplikace byl vybrán herní engine Unity, který je běžně používaný k tvorbě grafických aplikací. Tento nástroj efektivně kombinuje 2D nástroje, využití pro uživatelské rozhraní, a 3D nástroje pro vizualizaci polohy. Díky bohatému využití MOCAP technologie v herním průmyslu Unity disponuje moduly pro práci s těmito technologiemi. Ačkoliv v této práci nebyly těchto nástrojů využito, nabízejí významné možnosti pro budoucí rozšiřování funkcionalit aplikace. Unity pracuje s programovacím jazykem C#, což umožňuje implementaci logických funkcí prostřednictvím skriptů. Díky své otevřenosti a příznivé licenční politice, která umožňuje široké využití zdarma, včetně vývoje této aplikace, je Unity ideální volbou. Platforma má rozsáhlou online dokumentaci a bohatý ekosystém dostupných knihoven a nástrojů, což usnadňuje vývoj.

Jako podpůrný nástroj pro vývoj, speciálně pro tvorbu DHM (viz. Kapitola 10), byl zvolen Blender, uživatelsky přívětivý program pro práci s obecnou 3D grafikou. Blender je open-source a lze jej využívat zdarma bez jakýchkoli omezení.

Pro tvorbu několika 2D grafických elementů pro uživatelské rozhraní byl využit open-source rastrový editor Krita. Pro tvorbu a editaci kódu C# pro Unity byl použit také open-source program Visual Studio Code.

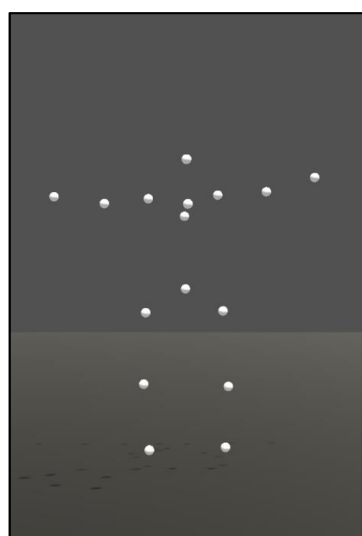
3.5 Integrace MOCAP záznamu do aplikace

Do aplikace byl během implementace zahrnut následující výchozí formát CSV souboru, který je výsledkem exportu z programu Vicon Tracker (**Obrázek 3.5.1**). V úvodu sloupec A definuje snímkovací frekvenci 240 snímků za sekundu. Ve třetím řádku jsou uvedena jména jednotlivých tagů. Od šestého řádku jsou na každém dalším řádku uloženy informace pro jeden daný snímek, přičemž jeden snímek obsahuje šest informací pro jeden tag: tři osové souřadnice pro polohu v milimetrech a tři pro rotaci v radiánech.

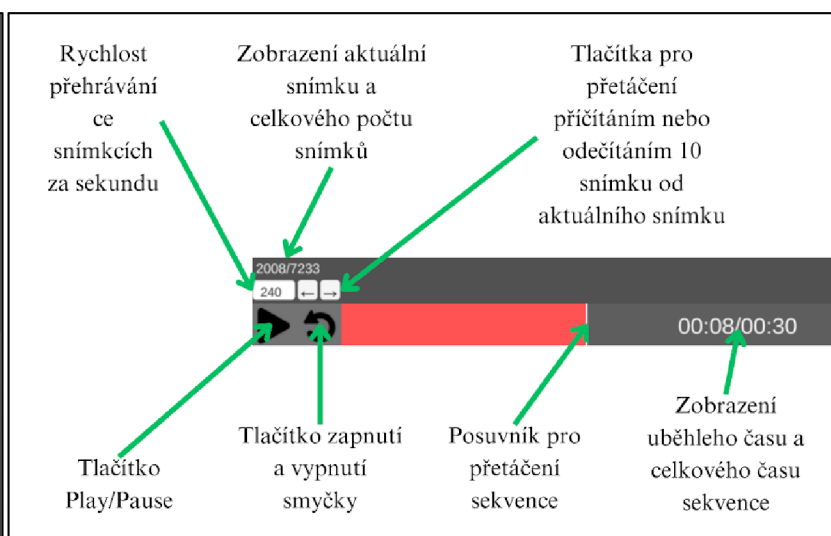
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Objects							
2	240							
3			Global Angle Chest:Chest					
4	Frame	Sub Frame	RX	RY	RZ	TX	TY	TZ
5			rad	rad	rad	mm	mm	mm
6	1	0	-1.412282	0.438453	2.344948	399.122742	-194.665359	1313.789551
7	2	0	-1.411251	0.439423	2.342643	398.493103	-193.238373	1313.684326
8	3	0	-1.410762	0.441928	2.339642	397.951050	-191.797028	1313.575195
9	4	0	-1.409630	0.443408	2.336874	397.314667	-190.408325	1313.448853
10	5	0	-1.412631	0.446055	2.332191	396.665710	-189.017593	1313.352539

Obrázek 3.5.1 Ukázka výchozího vyexportovaného CSV souboru z programu Vicon Tracker pro jeden tag a pro prvních 5 snímků

Pro aplikaci byl napsán C# skript, který importuje tento CSV soubor. Po načtení souboru jsou nejprve přečtena jednotlivá jména tagů a ve 3D prostoru jsou vytvořeny objekty jako jejich reprezentace s příslušným pojmenováním. Nejdůležitější částí je pak funkce, která aktualizuje pozici jednotlivých objektů podle zadaného čísla snímku. Na tom jsou postaveny další funkce, které zprostředkovávají přehrávání celé sekvence. V základní funkci Update(), která je v Unity volána v každém snímku, když aplikace běží, je spravováno časování aktualizace pozic objektů v závislosti na definované snímkové frekvenci s postupnou inkrementací snímku v CSV souboru, což vytváří pohyblivé body (**Obrázek 3.5.2**). Jednotlivé přehrávací funkce jsou znázorněny na **Obrázek 3.5.3**.



Obrázek 3.5.2 Pohyblivé body ve 3D prostředí



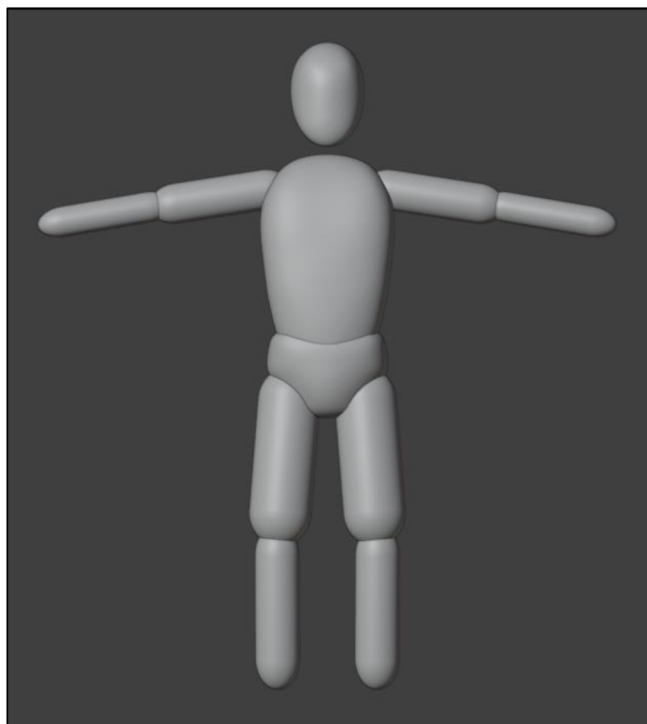
Obrázek 3.5.3 Přehrávací funkce aplikace

3.6 Tvorba DHM

Hrubý digitální lidský model, použitý v aplikaci, byl vytvořen v programu Blender. (*Obrázek 3.6.1*). Zvlášť byly modelovány následující části těla: hlava, paže, předloktí, hrud', kyčel, stehna a lýtka. Model je zjednodušený a neobsahuje zápěstí, nártý a prsty, jelikož používaný formát MOCAP dat nemá o těchto částech žádné informace. Jednotlivé modely byly následně exportovány ve formátu FBX a importovány do Unity.

Model člověka rozdělený na jednotlivé části nabízí řadu výhod v aplikaci:

- Snadné propojení segmentů s pohyblivými body, které byly ilustrovány v předchozí kapitole.
- Možnost barevné signalizace ergonomického stavu přímo na modelu změnou barvy segmentu.
- Možnost skrýt nebo zobrazit jednotlivé segmenty těla.
- Odbourání defektů vzniklých rozdíly v tělesných proporcích mezi MOCAP uživatelem a modelem. Rozdíly v antropometrických proporcích jsou kompenzovány prolnutím jednotlivých segmentů do sebe nebo od sebe, což nemá vliv na polohu a přesnost ergonomické evaluace, jak je ilustrováno v kapitole 2.2.2 „Adaptace skeletonu na různé tělesné typy“.
- Dostačující pro účely vizualizace pracovní polohy.



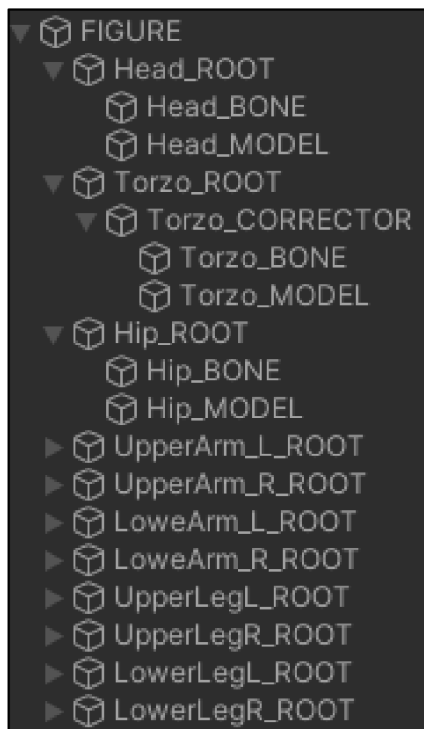
Obrázek 3.6.1 Vymodelovaný DHM rozdělený na části v Blender

3.7 Propojení MOCAP dat se skeletem a vizualizace segmentů

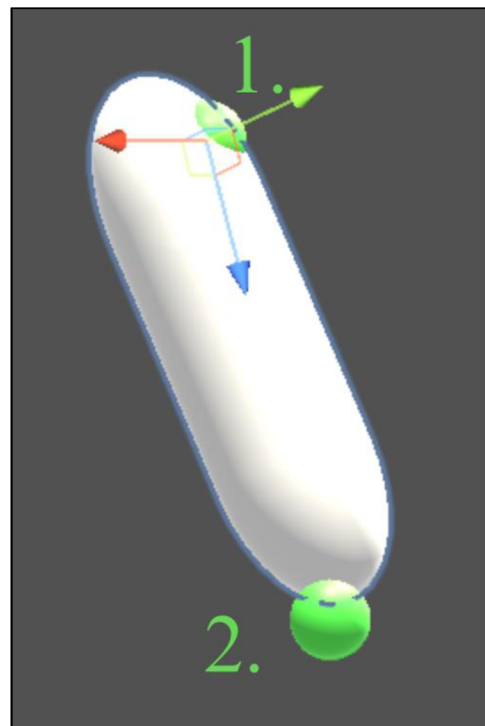
Pro každý segment byl ve scéně Unity pod hlavním objektem „FIGURE“ vytvořen jeden příslušný řídicí objekt s příponou „ROOT“ a pod ním dva podřazené objekty, jeden s příponou „BONE“ a druhý s „MODEL“. Formát tohoto stromu objektů je znázorněn na **Obrázek 3.7.1** kde pro ilustraci jsou kompletně rozloženy jen některé řídicí ROOT objekty. U segmentu „Torzo“ si lze všimnout, že je přítomný mezičlen „CORRECTOR“, je přítomný pouze v tomto případě a jeho význam je vysvětlen dále.

Funkce každého objektu ve stromě:

- ROOT – Řídící objekt. Řídí polohu a natočení svých podřazených objektů.
- CORRECTOR – Opravný člen natočení podřazených objektů.
- MODEL – Nese vizuální 3D model daného segmentu.
- BONE – Nese směrový vektor reprezentující polohu segmentu pro odměřování vychylenek při ergonomické evaluaci.



Obrázek 3.7.1 Strom objektů DHM v Unity



Obrázek 3.7.2 Mapování modelu levé paže

K jednotlivým ROOT objektům je přiřazen script, který řídí jejich polohu a natočení. Pro ilustraci budu konkrétně popisovat mapování levé paže (*Obrázek 3.7.2*). Script si za vstup bere dva vhodně zvolené pohyblivé body z načteného CSV souboru, které jsou relevantní pro zvolenou část těla.

1. Prvním bod (LUpperArm) určuje polohu tím, že objekt ROOT přímo kopíruje polohu prvního bodu.
2. Druhý bod (LLoweArm) určuje natočení tím, že směrový vektor Forward objektu ROOT (modrý vektor na *Obrázek 3.7.2*) je funkcí LookAt() natáčen směrem k poloze druhého bodu.

Aby byla zaručena správná funkčnost jednotlivé ROOT objekty a jejich podřazené objekty musí být vůči sobě napolohované určitým způsobem. Tím, jak objekt ROOT přímo kopíruje polohu prvního bodu, ROOT objekt vůči objektu MODEL musí zaobírat takovou polohu, že přímo reprezentuje reálnou polohu tagu (ROOT) na části těla (MODEL), kterou měl aktér při nahrávání MOCAP záznamu. I to lze vidět na *Obrázek 3.7.2*. Počátek vektorů ROOT je v takové poloze vůči MODEL, ve které byl tag (LUpperArm) na levé paži při nahrávání.

```
public class MoveRUpperArm : MonoBehaviour
{
    public GameObject position;
    public GameObject rotation;

    // Start is called before the first frame update
    void Start()
    {
        position = UnityEngine.GameObject.Find("Tracking Points/RUpperArm");
        rotation = UnityEngine.GameObject.Find("Tracking Points/RLowerArm");
    }

    // Update is called once per frame
    void Update()
    {
        if (position == null) { return; }

        transform.position = position.transform.position;

        if (rotation == null) { return; }

        transform.LookAt(rotation.transform.position);
    }
}
```

Obrázek 3.7.3 Script pro propojení pravé paže a příslušných bodů

3.8 Hodnocení pracovní polohy dle ergonomického posouzení

Pro ergonomickou analýzu byla zvolena metoda RULA z důvodu jejích specifických výhod.

Výhody metody RULA:

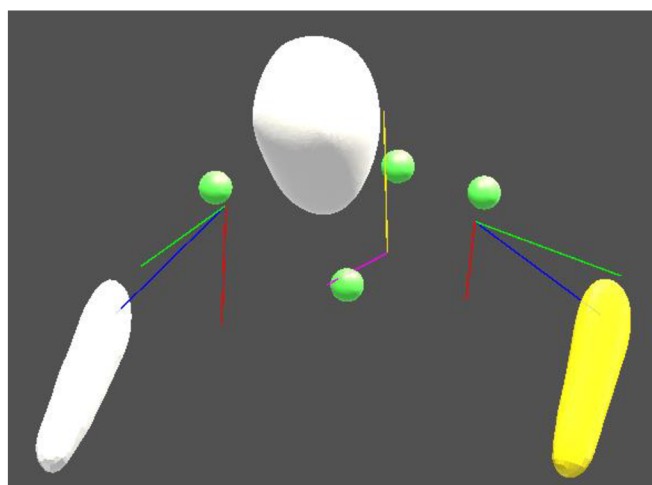
- Jednoduchost
- Přehledná metodika
- Rozšířené použití na mezinárodní úrovni
- Poskytuje solidní základ pro začlenění dalších metod

V kapitole 1.4.1, věnované RULA analýze, je popsán postup práce s touto metodou.

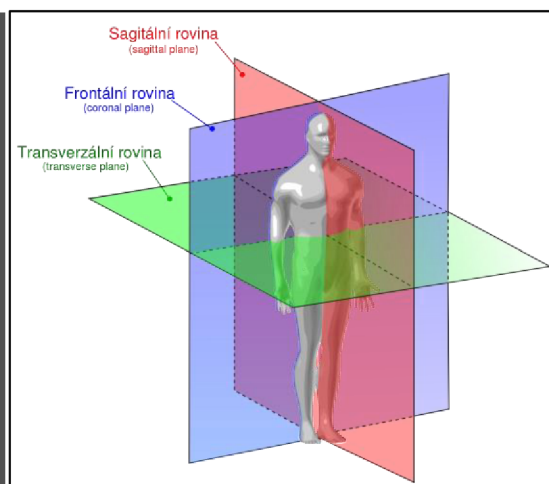
„Začíná se stanovením základního skóre pro každou část těla na základě jejich polohy vzhledem k neutrální pozici, s postupným bodováním dle odchylek. K tomuto základnímu skóre mohou být dále přičteny body za specifické pohyby, jako jsou rotace nebo ohyby a také hmotnost manipulovaného břemene a vliv statické práce.“

Prvním krokem při správném ergonomickém hodnocení pomocí metody RULA je měření odchylek každé části těla v každém okamžiku zaznamenané sekvence. Polohy tělesných segmentů jsou v aplikaci určeny skriptem, který měří úhly mezi vektory těchto segmentů a příslušnými referenčními vektory.

Jako příklad měření polohy slouží paže v DHM systému. V předchozí kapitole byl objekt BONE umístěn tak, aby jeho vektor Forward určoval směr segmentu, vizualizovaný na **Obrázek 3.8.1** modrou čarou mezi dvěma body. Pro správné určení polohy segmentu je nutné tento vektor promítnout do základních rovin člověka (**Obrázek 3.8.2**), které jsou definovány normálovými vektory segmentu torza. Vektor Forward objektu BONE (modrá čára) je poté promítnut do frontální a sagitální roviny, relevantní pro polohu paže. Promítnutí do frontální roviny je znázorněno zelenou čarou a do sagitální roviny červenou čarou. V obou rovinách se poté měří odchylka těchto promítnutých vektorů od referenčního svislého vektoru torza, zobrazeného na obrázku žlutou čarou.

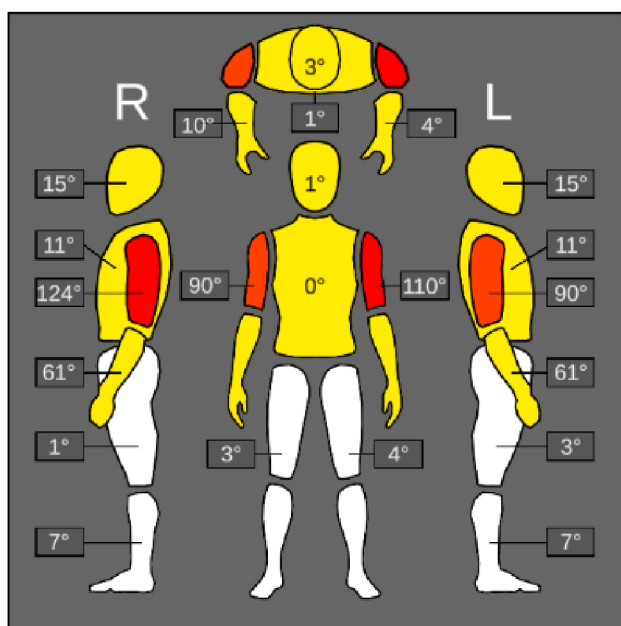


Obrázek 3.8.1 Orientace paží dle vektorů

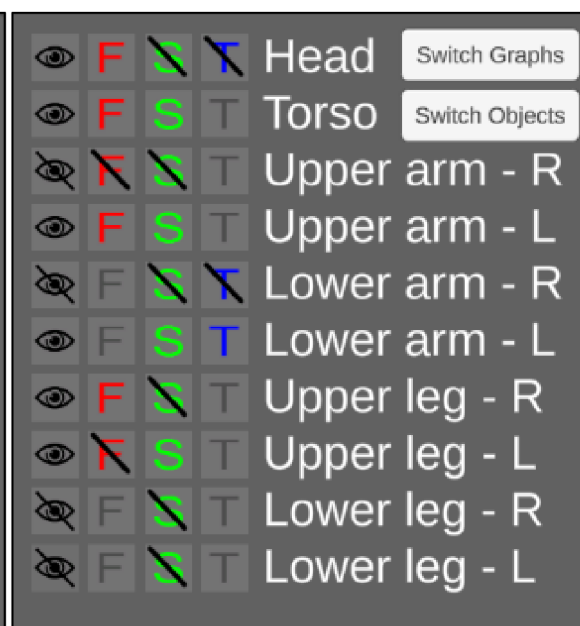


Obrázek 3.8.2 Anatomické roviny u člověka [27]

Tento princip měření je aplikován na všechny další segmenty, včetně určení případné rotace a ohybu části DHM v relevantních rovinách člověka. Výsledky měření pro daný snímek nahrávky jsou zobrazovány v části aplikace „2D vizualizace polohy“ (**Obrázek 3.8.3**). Zobrazení je doplněno barevnými signalizacemi podle výchylek založených na metodě RULA. Barevná stupnice sahá od bílé (nejlepší) po červenou (nejhorší). Současně jsou hodnoty zaznamenávány do časového grafu (**Obrázek 3.8.5**). Pro vykreslování grafů byla využita knihovna C# pro Unity „XCharts“, která umožňuje pokročilou práci s grafy a vizualizací. Vzhledem k tomu, že je zaznamenáváno více hodnot, lze pro lepší přehlednost v okně jednotlivých segmentů v grafu zvlášť skrýt a zpětně zobrazit zaznamenávané hodnoty v příslušných rovinách (F-frontální, S-sagitální, T-transverzální) (**Obrázek 3.8.4**). Protože pro některé roviny nemá promítání určitých segmentů smysl, některá z těchto tlačítek jsou zašedlá. Pro přívětivější ovládání je v panelu přítomné tlačítko „Switch Graphs“, které hromadně neguje aktuální skrytí/zobrazení hodnot v grafu.



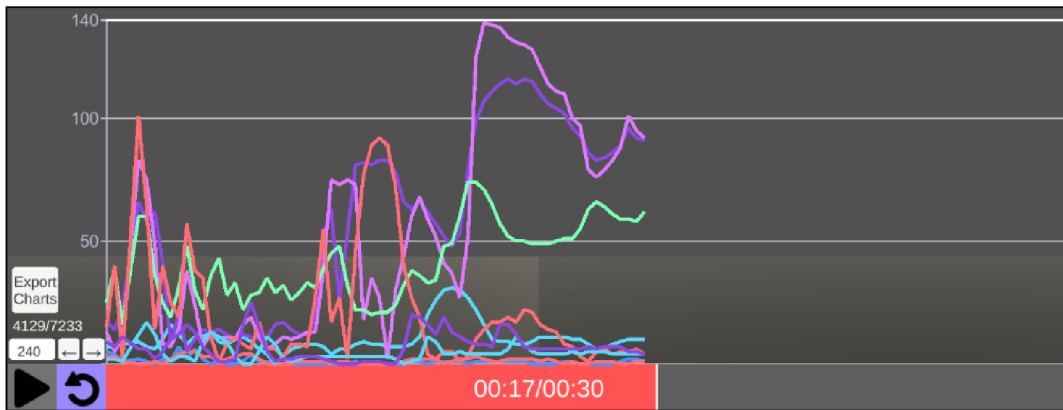
Obrázek 3.8.3 2D vizualizace polohy



Obrázek 3.8.4 Menu jednotlivých segmentů těla

Současně lze ve stejném panelu skrýt a zobrazit jednotlivé 3D segmenty DHM pomocí tlačítka s ikonou oka u příslušného segmentu. Barevná signalizace je aplikována i na samotném DHM, které kopíruje princip barevné signalizace ve 2D panelu vizualizace polohy (**Obrázek 3.8.7**).

Podle naměřených odchylek je ve skriptu segmentům přiřazeno příslušné RULA skóre podle RULA tabulek. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v sekci aplikace „RULA ovládání a hodnocení“ (**Obrázek 3.8.6**). Jelikož některé hodnoty nelze vyčíst z nahraného záznamu, jako je například poloha zápěstí, hmotnost manipulovaného břemene a vliv statické práce, je k dispozici rozhraní, do kterého lze tyto údaje manuálně doplnit. Z doplněných údajů a naměřených odchylek je vypočítáno celkové RULA skóre, které určuje naléhavost potřebných opatření.



Obrázek 3.8.5 Časový graf výchylek segmentů DHM v příslušných rovinách

RULA assessment		R		L		R		L	
UpperArms		6	6	Neck		2			
LowerArms		1	1	Trunk		4			
Wrists		3	3	Legs		2	2		
RULA SCORE:		5							

<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Raised shoulders	Wrists position	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Arms supported	<15	<15
Amrs / Wrists - Muscle use		Wrists bent		
2kg-10kg (intermittent)		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
Legs supported		Wrists twist		
Trunk / Legs - Muscle use		mid-range		
<2kg		mid-range		

Obrázek 3.8.6 Okno pro ovládání a hodnocení RULA analýzy



Obrázek 3.8.7 DHM b poloze

V aplikaci jsou implementovány dva způsoby vyhodnocování polohy metodou RULA, které lze přepínat v pravém horním rohu panelu „RULA ovládání a hodnocení“. Výchozí způsob „Frame Assessment“ představuje klasický způsob vyhodnocování, kdy je analyzován konkrétní zobrazený snímek bez závislosti na předešlých snímcích. Při této metodě je třeba dát pozor na přítomnost ztracených, prohozených nebo jakkoli špatně nasnímaných tagů, které se často vyskytují v nevyčištěném MOCAP záznamu pořízeném optickým systémem. V případě detekce anomálie je třeba změnit snímek na ten, kde, již anomálie není přítomna. Druhý způsob „Sequence Assessment“ vyhodnocuje současný snímek ve vztahu k již přehraným snímkům a vybírá nejhorší možnou kombinaci poloh jednotlivých částí těla. Tento způsob zaznamenává také čas, po který byla každá část těla v dané poloze, což umožňuje filtrovat anomálie v záznamu. Ve skriptu je nastavená hranice půl sekundy, po jejímž překročení je poloha považována za validní a je započítána do hodnocení polohy. Tento způsob je vhodnější pro analýzu krátkých úkonů.

Kdykoli během analýzy lze zobrazit kompletní shrnutí analýzy RULA metodou pomocí tlačítka „RULA Sheet“ v hlavním menu, kde je popsána metodika postupu, hodnoty mezikroků a zvyrazněny použité kroky. (Obrázek 3.8.8) Tento list lze exportovat tlačítkem „RULA Export“, které se zobrazí pouze při zobrazeném RULA listu a umožňuje uložit obrázek ve formátu PNG do zvolené destinace prostřednictvím systémového prohlížeče souborů.

Dalším výstupem aplikace je možnost exportu dat z časového grafu výchylek segmentů DHM. Tlačítko „Export Charts“ v levém dolním rohu na Obrázek 3.8.5, které se zobrazí, pokud je graf aktivní, otevře systémový prohlížeč souborů, jímž lze uložit CSV soubor s daty z grafu, které lze dále zpracovávat. (Obrázek 3.8.9)

RULA Worksheet

A. Arm and Wrist Analysis
Step 1: Locate Upper Arm Position:

Step 1a: Adjust...
 ● If shoulder is raised: +1
 ● If Upper arm is abducted or person is leaning: -1
6
 Upper Arm Score

Step 2: Locate Lower Arm Position

Step 2a: Adjust...
 If either arm is working across midline or outside of body: +1
 Step 3: Locate Wrist Position:

Step 3a: Adjust...
 If wrist is bent from midline: +1
 Step 4: Wrist Twist:
 If wrist is at or near end of range: 2+
 Step 5: Look-up Posture Score in Table A:
 Using values from steps 1-4 above, locate score in Table A

Step 6: Add Muscle Use Score
 If posture Manily static (held > 1 minute), Or if repeated 4x per minute: +1
 Step 7: Add Force/Load Score
 If load < 2 kg: +0
 ● If load 2 - 10 kg (intermittent): +1
 If load 2 - 10 kg (static/repeated): +2
 If load > 10 kg or repeated or shock: +3
 Step 8: Find Row in Table C
 Add values from steps 5-7 to obtain Wrist and Arm Score. Find row in Table C.

B. Neck, Trunk and Leg Analysis
Step 9: Locate Neck Position:

Step 9a:
 If neck is twisted: +1
 If neck is side bending: +1
 Step 10: Locate Trunk Position:

Step 10a:
 If trunk is twisted: +1
 If trunk is side bending: +1
 Step 11: Legs:
 If legs and feet are supported: +1
 If not: +2
 Step 12: Look-up Posture Score in Table B:
 Using values from steps 9-11 above, locate score in Table B.

Step 13: Add Muscle Use Score
 If posture Manily static (held > 1 minute), Or if repeated 4x per minute: +1
 Step 14: Add Force/Load Score
 If load < 2 kg: +0
 ● If load 2 - 10 kg (intermittent): +1
 If load 2 - 10 kg (static/repeated): +2
 If load > 10 kg or repeated or shock: +3
 Step 15: Find Row in Table C
 Add values from steps 5-7 to obtain Wrist and Arm Score. Find row in Table C.

Scores

Table A		Wrist Score			
Upper Arm	Lower Arm	Wrist Twist 1	Wrist Twist 2	Wrist Twist 3	Wrist Twist 4
1	1	2	2	2	3
1	2	2	2	3	3
1	3	2	3	3	3
2	1	2	3	3	4
2	2	3	3	3	4
2	3	3	4	4	5
3	1	3	4	4	5
3	2	3	4	4	5
3	3	4	4	4	5
4	1	4	4	4	5
4	2	4	4	4	5
4	3	4	4	5	6
5	1	5	5	5	6
5	2	5	6	6	7
5	3	6	6	7	7
6	1	7	7	7	8
6	2	7	8	8	9
6	3	9	9	9	9

Table C		Neck, Trunk, Leg, Score						
Wrist / Arm Score	Neck Posture Score	1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5	
2	2	2	3	4	5	5		
3	3	3	3	4	5	6		
4	3	3	3	4	5	6		
5	4	4	4	5	6	7		
6	4	4	5	6	6	7		
7	5	5	6	6	7	7		
8+	5	5	6	7	7	7		

1-2 = Acceptable posture
 3-4 = Further investigation, change may be needed
 5-6 = Further investigation, change soon
 7 = investigate and implement changes

RULA Score
5

Obrázek 3.8.8 Exportovaný RULA list

head_F		head_S		head_T		torso_F		torso_S		upperArm_R_F	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0	5	0	1	0	36	0	3	0	7	0	21
1	4	1	2	1	30	1	3	1	7	1	24
2	1	2	4	2	7	2	1	2	8	2	53
4	2	4	7	4	10	4	0	4	9	4	36
5	1	5	10	5	7	5	0	5	7	5	70
6	0	6	13	6	0	6	1	6	6	6	85
7	2	7	10	7	12	7	0	7	10	7	56
8	1	8	17	8	4	8	2	8	16	8	23
9	7	9	6	9	29	9	4	9	12	9	26
10	2	10	20	10	13	10	5	10	8	10	38
11	6	11	14	11	23	11	5	11	11	11	28
12	2	12	15	12	9	12	3	12	11	12	20
13	0	13	17	13	0	13	3	13	13	13	22

Obrázek 3.8.9 Exportovaný CSV soubor s daty z grafu

Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit aplikaci pro vizualizaci pracovní polohy s podrobnou ergonomickou analýzou z nahraných dat MOCAP. Aplikace umožňuje načíst sekvenci MOCAP dat a promítnout ji na digitální model člověka, čímž detailně vizualizuje pracovní polohu včetně jednotlivých částí těla.

Pro splnění tohoto cíle bylo zapotřebí nejdříve prostudovat celou problematiku ergonomie, technologii MOCAP a zjistit různé možnosti tvorby aplikace. Vývoji samotné aplikace předcházela nutnost blízkého seznámení s komplexním nástrojem Unity a práce s ním, včetně ovládnutí programovacího jazyka C#, se kterým Unity pracuje.

Od začátku se pracovalo s MOCAP daty v jednoduchém formátu CSV, díky čemuž aplikace není závislá na určitém MOCAP systému a lze pracovat s daty z jiných zdrojů při zachování pevně dané struktury CSV souboru.

Největší úskalí nastalo během propojení MOCAP dat s DHM. Zde byl využit digitální model člověka rozdělený na jednotlivé tělesné části, který díky kompromisu zjednodušené vizuální stránky DHM přináší vysokou flexibilitu a další řadu výhod.

Pro vyhodnocení pracovních poloh byla využita metoda RULA, která doplněná o časové funkce dává skvělý základ pro implementaci dalších metod. Uživatel má také možnost exportovat grafy a výsledky analýzy pro další zpracování.

Výsledkem práce je funkční aplikace, která splňuje stanovené cíle, a protože byla vytvořena v enginu Unity, který má příznivé licenční podmínky, lze aplikaci v budoucnu jakkoli modifikovat a rozšiřovat její funkce. V budoucnu by bylo možné aplikaci rozšířit o další funkce, jako je například analýza v reálném čase, možnost porovnání různých pracovních poloh a implementace dalších metod pro ergonomické vyhodnocení.

Tato aplikace může být využita v praxi pro ergonomickou analýzu pracovních úkonů a identifikaci potenciálních rizik pro zdraví pracovníků. Díky vizualizaci pracovní polohy a ergonomickému hodnocení může aplikace přispět ke zlepšení pracovních podmínek a snížení rizika vzniku pracovních úrazů a onemocnění.

Zdroje

- [1] Anon., 2021. *What Is Ergonomics (HFE)? - International Ergonomics Association*. 2021-03-07. Dostupné z: <https://iea.cc/about/what-is-ergonomics/>. [citováno 2023-12-25].
- [2] MOORE, Susan M a Lisa J STEINER, [s. a.]. *Practical Demonstrations of Ergonomic Principles*.
- [3] Anon., 2020. *Maintaining Neutral Postures*. In: Environment, Health & Safety. 2020-09-28. Dostupné z: Environment, Health & Safety, <https://www.wisconsin.edu/ehs/osh/ergonomics-2/maintaining-neutral-postures/>. [citováno 2024-04-01].
- [4] HLÁVKOVÁ, MUDr. Jana a Mgr. Alena VALE, [s. a.]. *Ergonomické checklisty a nové metody práce při hodnocení ergonomických rizik*.
- [5] Anon., [s. a.]. *Metody ergonomie pro použití v praxi | ALTAXO*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.altaxo.cz/provoz-firmy/management/rady-pro-manazery/metody-ergonomie-pro-pouziti-v-praxi>. [citováno 2023-12-27].
- [6] BOHATOVÁ, Kateřina, 2012. *Tvorba aplikace pro hodnocení pracovišť pomocí ergonomických analýz*. online. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/2291>. [citováno 2023-12-30].
- [7] MALÝ, RNDr. Stanislav a Klára MALME, [s. a.]. *Objektivní vliv a subjektivní projevy nesprávných poloh, z pohledu zdravotních problémů a onemocnění MSD*.
- [8] ČESKO. § 27 nařízení vlády č. 361/2007 Sb., nařízení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci – znění od 22. 8. 2023. online. © AION CS 2010–2023 Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361#p27-1>. [citováno 31. 12. 2023].
- [9] MATOUŠEK, Oldřich, [s. a.]. *Bezpečnost, ochrana zdraví a ergonomie | BOZPinfo.cz*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/bezpecnost-ochrana-zdravi-ergonomie>. [citováno 2024-01-02].
- [10] SHORROCK, Steven a Claire WILLIAMS, 2017. *Human factors and ergonomics in practice: improving system performance and human well-being in the real world*. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1-4724-3925-3.
- [11] GÖRNER, Tomáš; Ondřej KURKIN; Patrik POLÁŠEK a Petr HOŘEJŠÍ, [s. a.]. *The possibility of ergonomic analysis of the work positions with the use of real movement in the digital environment*.
- [12] BUREŠ, Marek; Tomáš GÖRNER; Michal ŠIMON a Kateřina SEKULOVÁ, [s. a.]. *Usage of digital tools of ergonomics in practice*.
- [13] CATERINO, Mario; Marta RINALDI a Marcello FERA, 2023. *Digital ergonomics: an evaluation framework for the ergonomic risk assessment of heterogeneous workers*. online. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, roč. 36, č. 2, s. 239–259. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2090023>.
- [14] BAUMRUK, Martin, [s. a.]. *Tecnomatix Jack 7.0 Software pro ergonomii v praxi*. Online. Dostupné z: https://www.plm.automation.siemens.com/cz_cz/Images/Tecnomatix_Jack_7_tcm841-117308.pdf. [citováno 2024-03-18]

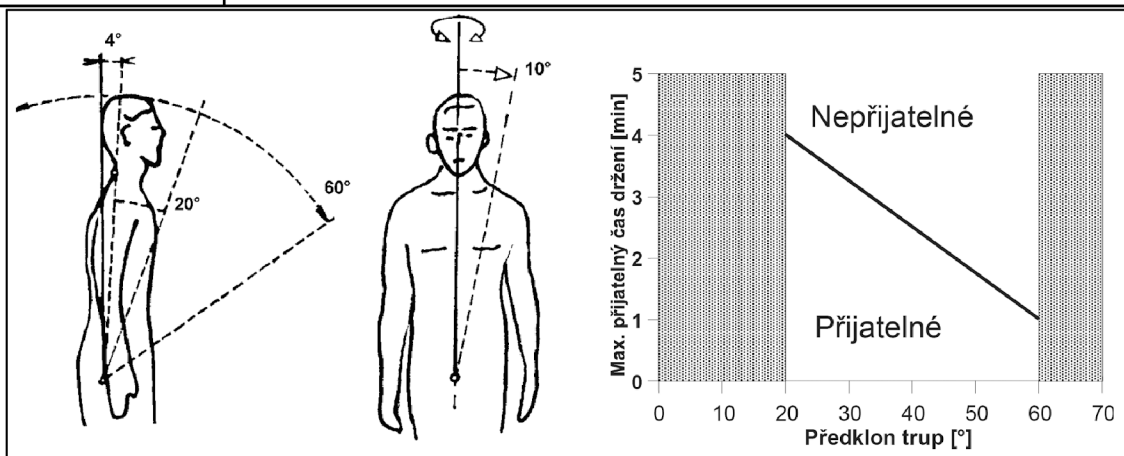
- [15] SANDILANDS, Peter; Myung Geol CHOI a Taku KOMURA, 2012. Capturing Close Interactions with Objects Using a Magnetic Motion Capture System and a RGBD Sensor. online. In: KALLMANN, Marcelo a Kostas BEKRIS (ed.). *Motion in Games*, s. 220–231. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-34710-8_21.
- [16] Anon., [s. a.]. *Problematika stárnutí a zapojování starších pracovníků do pracovního procesu*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://zsbozp.vubp.cz/problematika-starnuti-a-zapojovani-starsich-pracovniku-do-pracovniho-procesu>. [citováno 2024-03-18].
- [17] Anon., [s. a.]. *203R (K) Věk a vzdělání zaměstnaných v NH*. online. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/203r-k-vek-a-vzdelani-zamestnanych-v-nh-3p0r3pgp6i>. [citováno 2024-03-18].
- [18] Anon., [s. a.]. *Nemoci z povolání v České republice*. In: SZÚ | Oficiální web Státního zdravotního ústavu v Praze. Dostupné z: <https://szu.cz/publikace-szu/data/registr-nemoci-z-povolani/nemoci-z-povolani-v-ceske-republice/>. [citováno 2024-03-18].
- [19] Anon., [s. a.]. *Co je to ergonomie | BOZPinfo.cz*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/co-je-ergonomie>. [citováno 2024-03-25].
- [20] Anon., [s. a.]. *Ergonomie pracoviště – Encyklopedie BOZP*. Webové sídlo. Dostupné z: https://ebozp.vubp.cz/wiki/index.php?title=Ergonomie_pracovi%C5%A1t%C4%9B. [citováno 2024-03-31].
- [21] ČESKO. *Část 5 zákona č. 262/2006 Sb., zákoník práce – znění od 1. 1. 2024*. Webové sídlo. online. © AION CS 2010–2024. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-262#cast5>. [citováno 1. 4. 2024].
- [22] Anon., [s. a.]. *Ergonomická analýza – Encyklopedie BOZP*. Webové sídlo. Dostupné z: https://ebozp.vubp.cz/wiki/index.php?title=Ergonomick%C3%A1_anal%C3%BDza. [citováno 2024-04-02].
- [23] Anon., [s. a.]. *Motion Capture | Advanced Realtime Tracking GmbH & Co. KG*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://ar-tracking.com/en/product-program/motion-capture>. [citováno 2024-04-14].
- [24] Anon., [s. a.]. *AR & VR in Medical Training: Use Cases & Implementation*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://onix-systems.com/blog/ar-vr-in-medical-training>. [citováno 2024-04-14].
- [25] Anon., 2015. *Motion Capture II*. In: *Visual + Movement*. 2015-01-20. Dostupné z: *Visual + Movement*, <https://baswaramursyid.wordpress.com/2015/01/20/motion-capture-ii/>. [citováno 2024-04-14].
- [26] Anon., [s. a.]. *Vero | Compact Super Wide Camera by Vicon*. online. In: *Vicon*. Dostupné z: <https://www.vicon.com/hardware/cameras/vero/>. [citováno 2024-04-16].
- [27] Anon., 2023. *Orientace na lidském těle*. online. In: *Wikipedie*. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Orientace_na_lidsk%C3%A9m_t%C4%9Ble&oldid=22576646. [citováno 2024-04-23]. Page Version ID: 22576646.

Přílohy

Příloha A – Tabulky přijatelných a nepřijatelných poloh dle nařízení vlády č. 361/2007 Sb. [8]

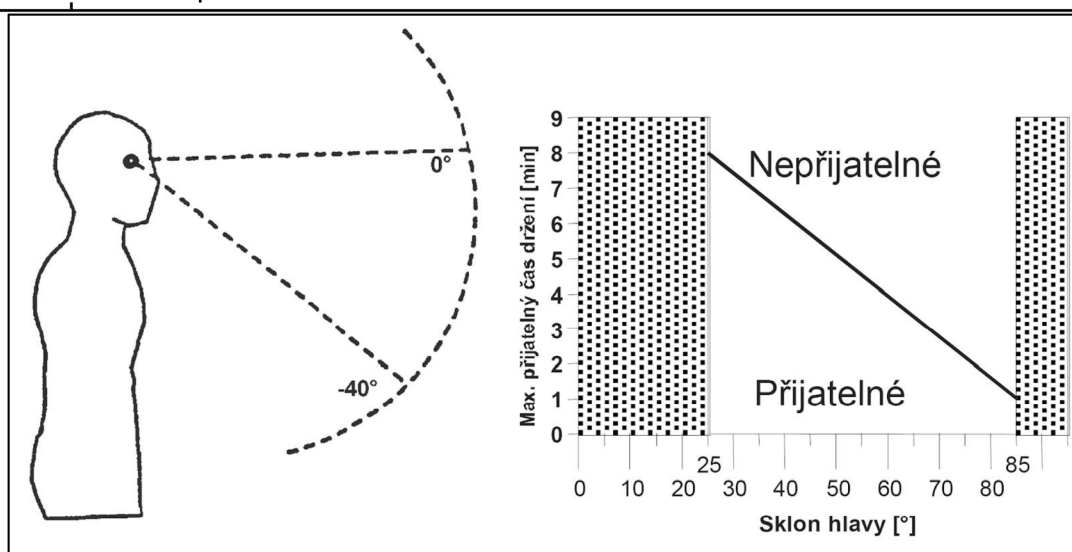
TRUP

KROK 1:	
NEPŘIJATELNÁ POLOHA	
Statická poloha	Předklon hlavy větší než 25° bez podpory trupu.
	Záklon hlavy bez podpory celé hlavy.
	Úklon a rotace hlavy větší než 15°.
Dynamická poloha	Úklon a rotace hlavy větší než 15° s frekvencí pohybů větší nebo rovné 2/min.
	Předklon hlavy větší než 25° při frekvenci pohybů větší nebo rovné 2/min.
	Záklon hlavy s frekvencí pohybů větší nebo rovné 2/min.
PODMÍNĚNĚ PŘIJATELNÁ POLOHA	
Statická poloha	<i>Předklon hlavy 25 až 40° s podporou celého trupu (KROK 2 A).</i>
Dynamická poloha	Předklon hlavy 25 až 40° při frekvenci pohybů menší než 2/min (KROK 2 B).
	Záklon hlavy do 15° při frekvenci pohybů menší než 2/min (KROK 2 B).
	Úklony a rotace hlavy do 15° s frekvencí menší než 2/min (KROK 2 B).
KROK 2:	A) Musí být dodržen maximálně přijatelný čas držení.
	B) Nepřijatelná, je-li stroj používán po dobu delší než polovinu pracovní směny.



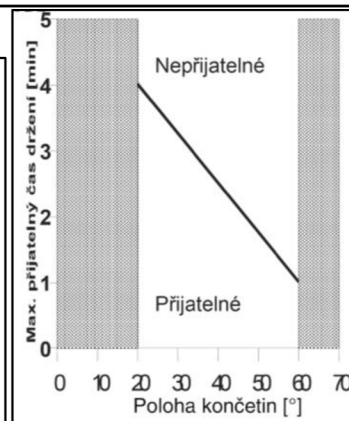
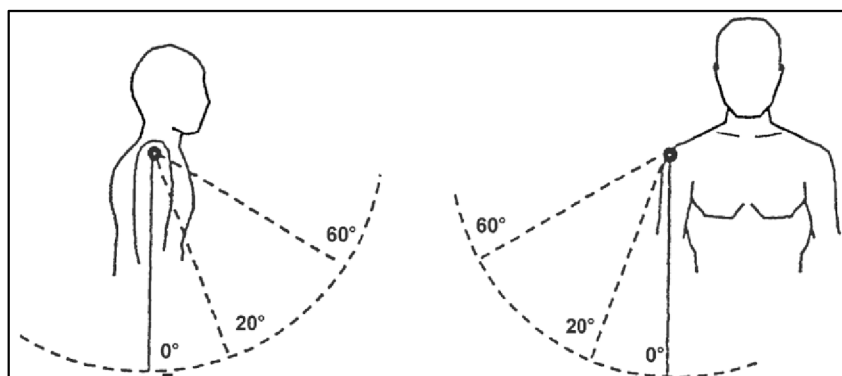
HLAVA – KRK

KROK 1:	
NEPŘIJATELNÁ POLOHA	
Statická poloha	Předklon hlavy větší než 25° bez podpory trupu.
	Záklon hlavy bez podpory celé hlavy.
	Úklon a rotace hlavy větší než 15°.
Dynamická poloha	Úklon a rotace hlavy větší než 15° s frekvencí pohybů větší nebo rovné 2/min.
	Předklon hlavy větší než 25° při frekvenci pohybů větší nebo rovné 2/min.
	Záklon hlavy s frekvencí pohybů větší nebo rovné 2/min.
PODMÍNĚNĚ PŘIJATELNÁ POLOHA	
Statická poloha	<i>Předklon hlavy 25 až 40° s podporou celého trupu (KROK 2 A).</i>
Dynamická poloha	Předklon hlavy 25 až 40° při frekvenci pohybů menší než 2/min (KROK 2 B).
	Záklon hlavy do 15° při frekvenci pohybů menší než 2/min (KROK 2 B).
	Úklony a rotace hlavy do 15° s frekvencí menší než 2/min (KROK 2 B).
KROK 2:	A) Musí být dodržen maximálně přijatelný čas držení.
	B) Nepřijatelná, je-li stroj používán po dobu delší než polovinu pracovní směny.



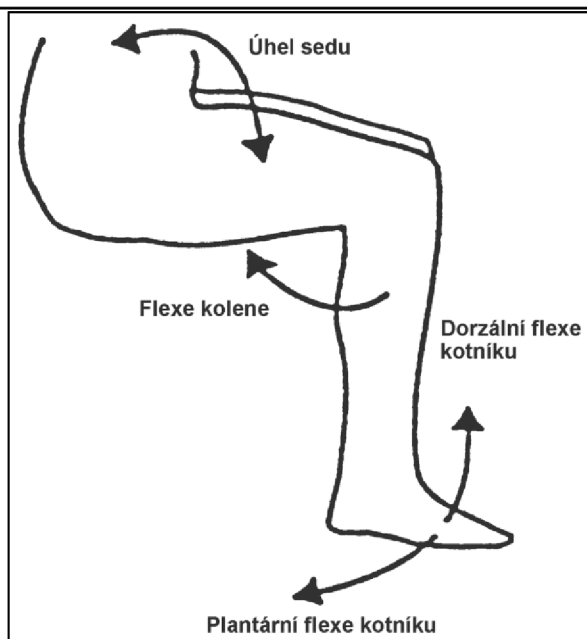
HORNÍ KONČETINY

KROK 1:	
NEPŘIJATELNÁ POLOHA	
Statická poloha	Nevhodná poloha paže (zpětné ohnutí paže, krajní zevní rotace paže, zvednuté rameno).
	Vzpažení paže větší než 60°.
	Extrémní polohy kloubů horních končetin, jejichž rozsah se blíží maximálnímu rozpětí.
Dynamická poloha	Vzpažení paže větší než 60° při frekvenci pohybu větší nebo rovné 2/min.
	Zapažení při frekvenci pohybu větší nebo rovné 2/min.
	Polohy kloubů v rozsahu, který se blíží maximálním rozpětím s frekvencí pohybů větší nebo rovné 2/min.
PODMÍNĚNĚ PŘIJATELNÁ POLOHA	
Statická poloha	<i>Vzpažení paže 40 až 60°, jestliže paže není podepřena (KROK 2 A).</i>
Dynamická poloha	Vzpažení paže 40 až 60° při frekvenci pohybů větší nebo rovné 2/min (KROK 2 2A).
	Zapažení při frekvenci pohybů menší než 2/min (KROK 2 B).
	Polohy kloubů v rozsahu, který se blíží maximálním rozpětím s frekvencí pohybů menší než 2/min.
KROK 2:	A) Musí být dodržen maximálně přijatelný čas držení.
	B) Nepřijatelná, je-li stroj používán po dobu delší než polovinu pracovní směny.



DOLNÍ KONČETINY

KROK 1:	
NEPŘIJATELNÁ POLOHA	
Statická poloha	Extrémní flexe kolena, extrémní dorzální/plantární flexe v kotníku.
	Extrémní polohy kloubů dolních končetin, jejichž rozsah se blíží maximálnímu rozpětí (např. extrémní flexe kolene, extrémní dorzální a palmární flexe v kotníku, vnitřní nebo zevní rotace kloubů dolních končetin).
	Extrémní polohy kloubů dolních končetin, jejichž rozsah se blíží maximálnímu rozpětí.
	Nevhodné polohy dolních končetin (extrémní flexe kolene, extrémní dorzální a palmární flexe v kotníku, vnitřní nebo zevní rotace kloubů dolních končetin).
Dynamická poloha	Polohy kloubů v rozsahu, který se blíží maximálním rozpětím s frekvencí pohybů větší nebo rovné 2/min.
	Vnitřní a zevní a rotace kloubů dolních končetin spojená s frekvencí pohybů větší nebo rovné 2/min.
	Vnitřní a zevní a rotace kloubů dolních končetin spojená s frekvencí pohybů větší nebo rovné 2/ min.
PODMÍNĚNĚ PŘIJATELNÁ POLOHA	
Dynamická poloha	Polohy kloubů v rozsahu, který se blíží maximálnímu rozpětí s frekvencí pohybů menší než 2/min (KROK 2).
	Vnitřní a zevní a rotace kloubů spojená s frekvencí pohybů menší než 2/ min.
KROK 2:	Nepřijatelné, je-li stroj používán po dobu delší než 4 hodiny.



OSTATNÍ ČÁSTI TĚLA

KROK 1:	
NEPŘIJATELNÁ POLOHA	
Statická poloha	Extrémní polohy kloubů.
Dynamická poloha	Polohy kloubů v rozsahu, který se blíží maximálním rozpětím s frekvencí pohybů větší nebo rovné 2/min.
PODMÍNĚNĚ PŘIJATELNÁ POLOHA	
Statická poloha	<i>Práce vleže, v kleče, v dřepu (KROK 2)</i>
Dynamická poloha	Polohy kloubů v rozsahu, který se blíží maximálnímu rozpětí s frekvencí pohybů menší než 2/min (KROK 2).
KROK 2:	Nepřijatelné, je-li stroj používán po dobu delší než 4 hodiny.

Příloha B – Tabulky hodnocení ruční manipulace s břemeny se zohledněním pracovní polohy [8]

Komprese [N]	Maximální povolený počet úkonů	Maximální povolená doba trvání úkonů [min]
6400	0	0,0
6105	10	1,2
5844	20	2,4
5611	30	3,6
5402	40	4,8
5213	50	6,0
5042	60	7,2
4887	70	8,4
4744	80	9,6
4613	90	10,8
4493	100	12,0
4381	110	13,2
4278	120	14,4
4182	130	15,6
4093	140	16,8
4009	150	18,0
3931	160	19,2
3857	170	20,4
3788	180	24,6
3723	190	22,8
3662	200	24,0
3603	210	25,2
3549	220	26,4
3496	230	27,6
3447	240	28,8
3400	250	30,0

Doba výkonu práce [min.]	+ Limitní hodnota [%]	Koeficient přepočtu	Doba výkonu práce [min.]	- Limitní hodnota [%]	Koeficient přepočtu
481-509	2,5	1,025	450-479	2,5	0,975
510-539	5	1,05	420-449	5	0,95
540-569	7,5	1,075	390-419	7,5	0,925
570-599	10	1,1	360-389	10	0,9
600-629	12,5	1,125	330-359	12,5	0,875
630-659	15	1,15	300-329	15	0,85
660-689	17,5	1,175	270-299	17,5	0,825
>689	20	1,2	240-269	20	0,8