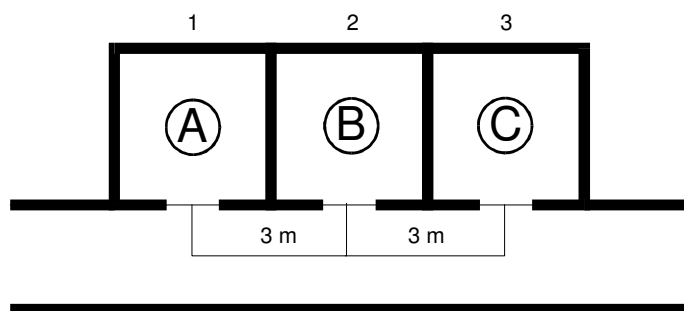


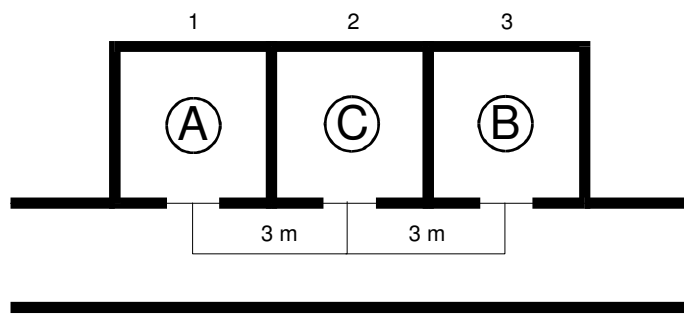
Wprowadzenie

Wiele spośród projektowanych stanowisk pracy wymaga podjęcia decyzji dotyczącej lokalizacji dużej liczby urządzeń, obsługiwanych później przez człowieka. Sposób lokalizacji powinien zapewnić efektywne funkcjonowanie przyszłego systemu człowiek-maszyna.

Istotę problemu rozmieszczania można pokazać na prostym przykładzie. Załóżmy że w pewnym budynku biurowym trzeba codziennie przenosić różne rodzaje dokumentów pomiędzy trzema rodzajami komórek (A,B,C). Średnio dziennie trzeba w związku z tym przejść 10 razy pomiędzy A i B (w jedną lub drugą stronę), 5 razy między B i C oraz 20 razy między A i C. Na rys 1 pokazano schemat korytarza, w którym mieszczą się pokoje (1,2 i 3) z komórkami A, B, C. Jeżeli przyjąć pierwsze rozmieszczenie komórek z rys 1 (LAYOUT_A) wówczas łatwo obliczyć że w trakcie dnia trzeba przejść $10 \cdot 3 + 5 \cdot 3 + 20 \cdot 6 = 165\text{m}$. Przyjmując, że w tych samych pokojach rozmieszczono komórki tak jak w (LAYOUT_B) te same czynności przenoszenia wymagają przejścia $10 \cdot 6 + 5 \cdot 3 + 20 \cdot 3 = 135\text{m}$.



LAYOUT A



LAYOUT B

Rys.1. Przykład zadania rozmieszczania

Widać zatem że w drugim przypadku można zrealizować zdefiniowany proces mniejszym wysiłkiem.

Przykład biura jest problemem współpracy kilku stanowisk roboczych ale zupełnie analogicznie można analizować pojedynczy układ człowiek- maszyna chociaż kryterium fizycznego przemieszczania się nie jest oczywiście jedynym sposobem oceny jakości rozmieszczenia elementów sygnalizacyjnych i sterowniczych w takim układzie.

Klasyczny przykład ergonomicznego zagadnienia rozmieszczenia opisywany między innymi w podręczniku McCormicka (1976) to problem projektowania kokpitu samolotu. Jednym z podzadań jest umieszczenie urządzeń sterowniczych które muszą być obsługiwane 'na ślepo'.

W takim przypadku rozsądne podejście polega na takiej aranżacji która gwarantuje największą niezawodność łączną trafiania do odpowiednich urządzeń. Podstawą takiej aranżacji są podane przez Fitts'a (1947) wyniki badań nad celnością ruchów 'ślepych', które w zależności od położenia celu względem operatora liczbowo ujmują średnie błędy w trafianiu do celu. Dysponując informacją o częstości użycia poszczególnych elementów (urządzeń sterowniczych) można obliczyć łączny średni błąd trafień dla danego rozmieszczenia sumując dla każdego urządzenia iloczyn częstości użycia i średniego błędu dla miejsca jego umieszczenia.

Tradycyjnie jako podstawę do oceny rozmieszczenia urządzeń w układzie człowiek – praca (człowiek-maszyna) stosuje się wiele różnych zasad i kryteriów. Na przykład Bonney i Williams (1977) wymieniają: typ populacji użytkowników, komfort obsługi, bezpieczeństwo, estetykę i modę, bliskość urządzeń dla ułatwienia obsługi, odpowiednią odległość urządzeń w celu unikania pomyłek, rozłożenie pracy na odpowiednie kończyny, wymiary antropometryczne oraz funkcjonalne zależności obsługiwanych urządzeń.

W podręcznikach (np. Proctor i Van Zandt 1994) zwraca się uwagę przede wszystkim na grupowanie funkcjonalne urządzeń, częstotliwość używania oraz kolejność używania.

Uwzględnianie tych (i wielu innych) czynników przez projektanta pracującego w sposób "tradycyjny" odbywa się intuicyjnie i jest tym lepsze, im szersza jest jego wiedza i większe doświadczenie. Próby formalizacji i obiektywizacji procesu podejmowania tego typu decyzji są prowadzone od wczesnych lat sześćdziesiątych (Mc Cormick E. J. 1976). Ze względu na naturę wielu z wymienionych czynników nie można ich wszystkich włączyć do modeli o charakterze matematycznym, operujących na wielkościach mierzalnych (lub dających się rozsądnie skwantyfikować). W wielu przypadkach formalne modele mogą mieć jedynie znaczenie narzędzi wspomagających proces projektowania. Istnieje jednak w literaturze ergonomicznej wiele przykładów, w których modele formalne w zupełności wystarczają, generując ostateczną decyzję

lokalizacyjną.

Modele ergonomiczne rozmieszczania obiektów

Nieformalne reguły aranżacji urządzeń, jak zaznaczono wyżej, są znane w ergonomii od dawna. Zestawione jeszcze w latach 60-tych najczęściej przywoływane reguły zalecają stosowanie następujących kryteriów (McCormick, 1976):

- a) ważność – rozumiane w ten sposób, że urządzenia najważniejsze (z punktu widzenia celów projektowanego układu) powinny być umieszczone w miejscach najważniejszych (najwygodniejszych z punktu widzenia ich obsługi)
- b) częstość użycia – najczęściej używane elementy należy lokować w miejscach najkorzystniejszych (jak poprzednio chodzi o obsługę tych elementów)
- c) kolejność użycia – urządzenia używane jedno po drugim powinny sąsiadować ze sobą
- d) spełniane funkcje – urządzenia związane z tą samą funkcją projektowanego systemu powinny być łączone w bloki (grupy)

Łatwo zauważyć, że poszczególne kryteria mogą w różnych sytuacjach dawać sprzeczne rozwiązania. Na przykład element ważny (powiedzmy wyłącznik związany z bezpieczeństwem) może być używany niezmiernie rzadko. Poza tym można sobie wyobrazić także większy lub/i inny zestaw zasad w szczególnych przypadkach. Nie można jednak jednoznacznie określić hierarchii poszczególnych kryteriów gdyż będzie ona zawsze bardzo mocno zależeć od konkretnych uwarunkowań danego przypadku. Mc Cormick (1976) sugeruje jednak iż kryteria a) i b) są szczególnie przydatne w rozmieszczaniu paneli (grup narzędzi itp.) w przestrzeni pracy, natomiast c) i d) w aranżacji pojedynczych paneli. Rzeczywiście kryteria a) i b) w istocie odnoszą się do relacji pomiędzy pojedynczymi urządzeniami a miejscami w przestrzeni a właściwie relacji pomiędzy miejscem w przestrzeni a operatorem podczas gdy c) i d) analizują jedynie wzajemne relacje przestrzenne urządzeń między sobą. Wierwille (1980) budując formalne modele zaproponował określenie kryteriów typu a) i b) **kryteriami pierwszego rzędu** (first order) (relacje mierzone przez to kryterium dotyczą pojedynczych urządzeń) a pozostałe dwa – **kryteriami drugiego rzędu** (relacje dotyczą par urządzeń).

W myśl przedstawionych reguł ogólny problem ‘ergonomicznego’ rozmieszczenia elementów stanowiska pracy można ‘sformalizować’ następująco:

Należy rozmieścić N urządzeń w przestrzeni pracy w taki sposób aby w maksymalnym stopniu spełnić zestaw kryteriów a)-d).

Formalny model tego zadania wymaga oczywiście zdefiniowania odpowiedniej skali pomiaru stopnia spełniania zestawu kryteriów a)-d). To z kolei prowadzi do konieczności określenia metod liczbowego pomiaru wartości każdego z kryteriów. Taki model jest niezbędny aby można było odróżnić jedno rozwiązanie od drugiego.

Typowe podejścia do operacjonalizacji kryteriów pierwszego rzędu polegają na konstruowaniu prostych skal kilkupunktowych wag oceniających urządzenia i miejsca ich lokalizacji. Ocena ważności czy częstości użycia jest formułowana przez ekspertów w oparciu o wiedzę o zadaniach jakie będzie spełniać projektowane stanowisko pracy. Ocena jakości danego miejsca musi bazować na wiedzy ergonomicznej i zależy od typu analizowanego elementu.

Dane rozwiązanie można w takiej sytuacji oceniać na przykład za pomocą formuły:

$$Q1 = \sum_i W_i * I_{p(i)} \quad (1)$$

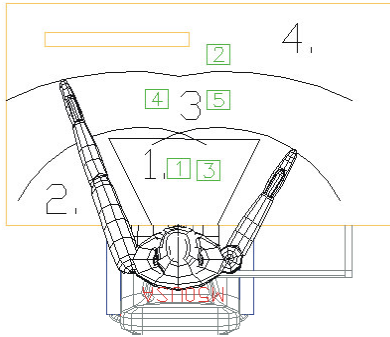
Gdzie W_i oznacza ważność urządzenia i dla kryterium a), częstość użycia urządzenia i dla kryterium b) natomiast $I_{p(i)}$ jest ważnością (jakością) miejsca umieszczenia elementu i ocenioną ergonomicznie a $p(i)$ jest indeksem miejsca umieszczenia i -tego elementu.

Jeżeli skala W jest uporządkowana malejąco (tzn. urządzenia ważniejsze mają wyższe oceny) a skala I odwrotnie wówczas lepsze rozwiązanie będzie miało mniejszą wartość $Q1$. Jeśli obie skale będą malejące wówczas lepsze będą rozwiązania o większej wartości $Q1$.

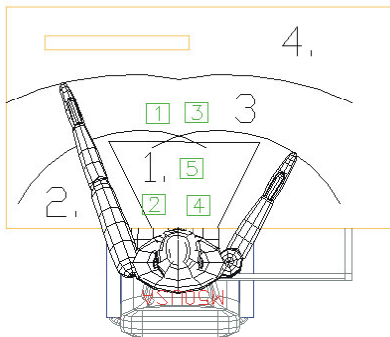
Poniżej pokazano przykład możliwego zastosowania kryterium 1 rzędu do analizy jakości rozmieszczenia pojemników, do których trzeba sięgać w trakcie pracy z określoną częstotliwością. Strefy pracy oceniono zgodnie z ogólnymi zasadami ergonomii zasięgow - przypisując im wagi od 1 - najlepszej do 4 - najgorszej .

Dane częstości sięgania do pojemników:
w procentach wszystkich czynności

- 1 - 10
- 2 - 20
- 3 - 5
- 4 - 40
- 5 - 25



Jakość rozwiązania
(liczymy strefami)
 $Q=10*1 + 5*1 + 40*3 + 25*3 + 20*4$



Jakość rozwiązania
 $Q= 1*(20+40+25) + 3*(10+5)$

Rys.2. Przykład zadania rozmieszczania 1 rzędu

Kryteria drugiego rzędu najczęściej modeluje się za pomocą sumy iloczynów wskaźników powiązań i odległości:

$$Q2 = \sum_i \sum_{j>i} L_{ij} * D_{p(i)p(j)} \quad (2)$$

L_{ij} – jest stopniem powiązania obiektów ij i dla kryterium c) oznacza na przykład jak często obsługa i występuje przed obsługą j (lub odwrotnie). Dla kryterium d) wskaźnik L może wyrażać stopień powiązania funkcjonalnego (zadaniowego) obu elementów ij . $D_{p(i)p(j)}$ oznacza odległość miejsc $p(i)$ i $p(j)$ w których odpowiednio umieszczono elementy i i j . Podwójna suma oznacza że w ocenie bierze się wszystkie pary urządzeń – $j>i$ w drugiej sumie ogranicza obliczenia do jednokrotnego uwzględnienia każdej pary. L_{ij} można zestawić w macierzy, w której na przecięciu wiersza i z kolumną j umieszcza się stopień powiązania obiektów i i j . Wówczas najczęściej wypełnia się macierze tylko nad główną przekątną bo tylko te wielkości uwzględnia wzór (2). Dla

przykładu z rysunku 1 na przykład będzie to

Komórka		A	B	C	
organizacyjna					
	A	-	10	20	_____ Powiązania L
	B		-	5	

W tym przypadku, ponieważ możliwe miejsca lokalizacji są ograniczone do konkretnych pokoi można podobnie zestawzić odległości między miejscami

Pokój		1	2	3	
	1	-	3	6	_____ odległość (w metrach)
	2		-	3	

Ponieważ ocena wg wzoru (2) wyraża ogólnie rzecz ujmując pewną ‘ważoną’ odległość naturalne będzie jeśli powiązania każdej pary obiektów będą wyznaczane tak , aby większej intensywności powiązania odpowiadała wyższa ocena liczbowa a wtedy lepsze rozwiązania będzie cechować niższa ocena według wzoru (2). Naturalną ocenę otrzymuje się dla sytuacji podobnych do tej z rys.1 gdzie ocena (2) jest po prostu długością drogi jaką muszą przejść pracownicy.

Poniżej pokazano przykład zastosowania kryterium 2-rzędu do analizy stanowiska pracy z poprzedniego rysunku. Założono tutaj że sięganie do pojemników odbywa się w znanych sekwencjach o ustalonej częstotliwości. Optymalizacja rozmieszczenia ma za zadanie minimalizować drogę ręki - zakładając, że w sekwencji operator sięga kolejno do potrzebnych pojemników.

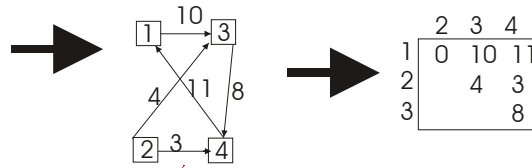
Dane do analizy:
Opis czynności np w formie sekwencji ruchów:

1 → 3 10 razy

2 → 4 → 1 3 razy

3 → 4 → 1 8 razy

2 → 3 4 razy

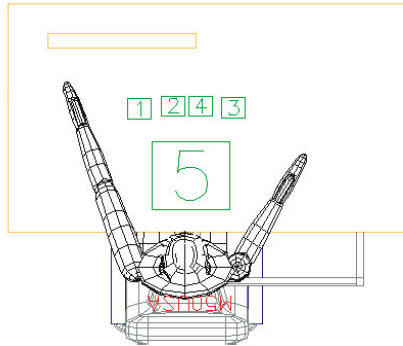


OCENA:

Odleglosc = liczba pojemnikow omijanych pomniejszona o jeden

$$Q = 10 \cdot 3 + 11 \cdot 2 + 4 \cdot 2 + 3 \cdot 1 + 8 \cdot 1$$

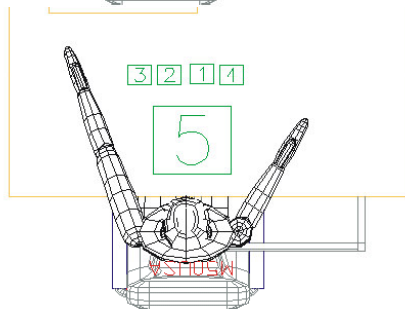
$$Q = 71$$



OCENA:

$$Q = 10 \cdot 2 + 11 \cdot 1 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 2 + 8 \cdot 3$$

$$Q = 76$$



Rys.3. Przykład zadania rozmieszczania 2 rzędu

Wzory (1) i (2) nie są jedynymi możliwymi modelami kryteriów rozmieszczania. W pracach Karwowskiego i in (1999) oraz Grobelnego i in (1995) zaproponowano na przykład zastosowanie teorii zbiorów rozmytych do konstrukcji metryk oceniających rozmieszczenie. Podejścia tego typu mają szczególne znaczenie w analizach ergonomicznych ponieważ pozwalają ująć w modelowaniu często znaczny stopień nieprecyzyjności związanej z opisem układu człowiek – obiekt techniczny. Opis lingwistyczny jest często bardziej naturalny zwłaszcza dla wyrażenia stopnia powiązania czy ważności od sztucznych skal liczbowych.

Kryteria pierwszego i drugiego rzędu można wyrazić językiem logiki w sposób bardzo zbliżony do wyrażenia w naturalnym języku. Na przykład reguła a) może być określona następująco:

IF Importance_level (of a given facility) is **GREAT**
THEN Location_place (of a given facility) is **PROMINENT** (3)

Natomiast regułę c) można wyrazić następująco:

IF facilities pair ij is **USED IN SEQUENCE**
THEN ij are **ADJACENT** in the layout (4)

Podkreślone wyrażenia są w tych określeniach konkretnymi realizacjami zmiennych lingwistycznych to znaczy takich, których wartościami są słowa. W regule (3) zmienne te to Importance level i prominency of a location place. Reguła (4) operuje na zmiennych które można by określić jako sekwencyjność użycia i sąsiedztwo. Tak sformułowane wyrażenia wyrażają ideę odpowiednich reguł w nieco bardziej sformalizowany sposób ale sens wyrażanych zależności jest wyraźny. Są to opisy pożądanego stanu – pewnego wzorca z jakim należy porównywać rzeczywiste rozwiązania . Operacjonalizacja reguł (3) i (4) musi polegać na dostarczeniu mechanizmów wartościowania tak aby jak w przypadku reguł (1) i (2) można było porównać każde 2 rozwiązania (i wybrać lepsze). Ponieważ reguły są wyrażeniami logicznymi najbardziej naturalny sposób wartościowania polega na zastosowaniu reguł logicznych do ich wartościowania. Idea ‘linguistic patterns’ (Grobelny i in 1995, Karwowski i in, 1999) polega na obliczeniu ‘stopnia spełniania’ wzorców typu (3) i (4)

przez badane rozwiązania. Można tego dokonać wykorzystując jedno z uogólnień klasycznej tablicy implikacji, która określa prawdziwość zdania IF a THEN b w zależności od prawdziwości składowych (poprzednika a i następnika b). Jedno z takich uogólnień to wzór Łukasiewicza :

$$\text{Tr}(\text{IF } a \text{ THEN } b) = \min (1, 1 - \text{Tr}(a) + \text{Tr}(b)) \quad (5)$$

gdzie Tr(...) oznacza stopień prawdziwości wyrażenia(...).

Łatwo zauważyć, że (5) działa jak klasyczna tablica prawdy implikacji jeśli za Tr(a) i Tr(b) przyjąć 0 i/lub 1 to znaczy wyrażenia są prawdziwe lub fałszywe. Stopień prawdy równy zero (czyli fałsz) zdanie osiąga wtedy kiedy a jest prawdziwe i b fałszywe. Rzeczywiste sytuacje oceny są jednak znacznie bliższe stopniowaniu prawdziwości i wówczas wzór (5) pozwala określić stopień prawdy implikacji na podstawie stopni prawdy członów a i b. Stopnie prawdy definiuje się w skali od 0 do 1. Wygodnym aparatem dostarczającym narzędzi formalnego budowania ocen stopnia prawdy jest teoria zbiorów rozmytych (...). Przedstawiane podejście może jednak być używane także w mniej formalny sposób poprzez wykorzystanie subiektywnych ocen

prawdziwości na przykład wyrażanych przez ekspertów. Dla przykładu rozpatrzmy sytuację z rys. 1. w diskutowanych kategoriach.

Najpierw zauważmy, że do problemu przypisania czynności do pokoju w powyższym przykładzie nie da się bezpośrednio zastosować ocen pierwszego rzędu – bo nic nie wiadomo o ‘cennieści’ poszczególnych pomieszczeń ani wadze czynności. Natomiast problem ilości przejść między pokojami można oceniać za pomocą wzorca typu (4). Do tego konkretnego przykładu wzorec (4) może być nieco zmodyfikowany tak aby użyte sformułowania nie budziły wątpliwości. Można na przykład zaproponować następujące wyrażenie:

IF częstość_przejść_pomiędzy_komórkami_i_j jest DUŻA
 THEN pokoje (w których umieszczono ij) SĄSIADUJĄ (ze sobą) (6)

Założmy, że sytuację oceniać mają ortodoksyjni eksperci uznający tylko logikę dwuwartościową (prawda, fałsz). Jeżeli znają dane z macierzy przedstawionych wyżej i akceptują wzorec (6) to – w oparciu o swą wiedzę i doświadczenie mogą na przykład zawyrokować że częstość przejść równa 20 jest duża a pozostałe nie. Natomiast sąsiadują ze sobą tylko pokoje mające wspólną ścianę a więc 1z2 i 2z3. Te oceny można również zestawić w macierzach przez analogię do wcześniejszych:

Komórka			
organizacyjna	A	B	C
A	-	0	1 _____ Stopień spełnienia lewej strony wzorca (6)
B		-	0

Pokój			
	1	2	3
1	-	1	0 _____ Stopień spełnienia prawej strony wzorca (6)
2		-	1

Mając te dane i rysunek 1 można teraz dokonać dla każdej pary komórek organizacyjnych oceny spełnienia wzorca stosując regułę (5).

Komórki	Layout a	Layout b
AB	$\min(1, 1-0+1) = 1$	$\min(1, 1-0+1) = 1$

AC	$\min(1, 1-1+0) = 0$	$\min(1, 1-1+1) = 1$
BC	$\min(1, 1-0+1) = 1$	$\min(1, 1-0+1) = 1$

Jak widać w pierwszym rozmieszczeniu wzorzec nie jest spełniony przez parę AC i jej rozmieszczenie. Ocena ta jest logiczna także ze zdroworozsądkowego punktu widzenia – ilość przejść między komórkami AC jest duża (wg oceny ekspertów) a pokoje gdzie je umieszczono nie sąsiadują ze sobą. W przypadku drugim wszystkie pary spełniają wzorzec. Ponieważ oceny według reguły Łukasiewicza wyrażają stopień prawdy i 1 oznacza ‘pełną prawdę’ nie można tak jak we wzorze (2) sumować tych ocen dla poszczególnych rozmieszczeń – raczej ‘średni stopień prawdy’ jest w tej sytuacji bardziej adekwatnym rozwiązaniem. A zatem layout spełnia wzorzec (6) w stopniu 2/3 layout b w stopniu 1 a więc łącznie.

Próba klasyfikacji zadań rozmieszczania i algorytmy optymalizacji

W dotychczasowych rozważaniach przedstawiliśmy kilka sposobów konstrukcji miar oceniających dane rozwiązania. Miary te w sposób liczbowy pozwalają porównać i wybrać rozwiązanie najlepsze ze zbioru dostępnych. Osobnym problemem jest sposób racjonalnego poszukiwania dobrych rozwiązań w różnych przypadkach projektowych. Ponieważ owe sposoby bardzo mocno są uwarunkowane niektórymi cechami projektów najpierw spróbujemy dokonać pewnej typologii zadań a następnie przypiszemy sposoby postępowania do typów zadań. W poprzedniej sekcji poznaliśmy pierwszy wyróżnik zadania rozmieszczania obiektów. Jest nim rząd przyjętego kryterium. Kryteria pierwszego rzędu jak wskazano sugerują sposób lokalizacji pojedynczych obiektów w przestrzeni pracy. Kryteria rzędu drugiego oceniają wzajemne relacje par obiektów. W rozpatrywanym przykładzie logiczne było stosowanie tylko reguły drugiego rzędu. Jak wspomniano tego typu reguły są przydatne także w projektowaniu paneli sterowniczych. W tego typu sytuacjach kryteria pierwszego rzędu są często nieprzydatne. Z drugiej strony wiele zadań projektowych może wykorzystywać tylko kryteria pierwszego rzędu. Jak wspomniano wcześniej rozmieszczenie gotowych paneli sterowniczych w przestrzeni może być oceniane za pomocą zasad pierwszego rzędu zwłaszcza gdy każdy panel obsługuje inną funkcję. Można także wyobrazić sobie sytuacje (zwłaszcza złożonych stanowisk operatorskich), w których jednocześnie trzeba szukać kompromisu między zasadami obu rzędów. Niewątpliwie zatem sytuacje projektowe w dziedzinie rozmieszczania obiektów mogą być (w uproszczeniu) sklasyfikowane jako zadania pierwszego rzędu, drugiego rzędu i złożone – w których oba typy kryteriów trzeba uwzględniać jednocześnie.

Podejścia związane z rozwiązywaniem zadań – optymalizacją rozmieszczeń – poza rzędem kryterium zależą także od sposobu ograniczania dostępnych miejsc lokalizacji. Przykład rozpatrzony wyżej jest reprezentantem zadania ograniczonego – miejsca lokalizacji komórek są zdeterminowane. Także wiadomo, że tylko jedna komórka ma mieścić się w jednym pokoju. Wyobrażając sobie jednak projektowanie nowego panelu sterowniczego łatwo zauważymy, że projektant może często decydować zarówno o rozmieszczeniu pojedynczych elementów na panelu, jak i o kształcie i rozmiarach samego panelu. Takie zadanie można określić mianem otwartego. Przyjmując przedstawione cechy zadań jako kryteria podziału otrzymamy sytuację przedstawioną w tabelicy 1.

	Typ kryterium		
	1-rzędu	2-rzędu	oba jednocześnie
miejsca dostępne określone	zadanie ograniczone 1 – rzędu	zadanie ograniczone 2 – rzędu	zadanie ograniczone złożone
miejsca dostępne dowolne	zadanie otwarte 1 - rzędu	zadanie otwarte 2 – rzędu	zadanie otwarte złożone

Tab. 1. Propozycja uproszczonej klasyfikacji zadań rozmieszczenia ze względu na typ kryterium i dostępność miejsc.

Wprowadzona klasyfikacja pozwala przypisać poszczególnym rodzajom zadań metody i algorytmy ich rozwiązywania prowadzące do uzyskania optymalnych lub suboptymalnych rozmieszczeń.

Zadanie ograniczone 1 rzędu modeluje dość powszechną sytuację projektową, w której znamy hierarchię ocen z jednej strony obiektów rozmieszczanych z drugiej strony oceny ‘przydatności’ zdefiniowanych miejsc lokalizacji. Typowy przykład to rozmieszczanie elementów w polu widzenia. Nawet jeśli miejsca dostępne nie są fizycznie zdeterminowane to oceny mogą być wyznaczone na podstawie wiedzy o polu widzenia człowieka i cała dostępna strefa może być odpowiednio oceniona na przykład poprzez przypisanie względnych ocen ostrości widzenia. Sytuacja tego typu jest prosta z punktu widzenia formalnej optymalizacji. Oczywiście rozwiązanie polega na kolejnym przydzielaniu najważniejszych obiektów do najlepszych dostępnych miejsc.

Jest to rozwiązanie optymalne a odpowiednie twierdzenie z algebry przytoczono np. w pracy Grobelnego (1988). Praktyczne wykorzystanie tego typu podejścia opisano w podręczniku McCormick (1976). Rozmieszczenie urządzeń sterowniczych w kokpicie samolotu zoptymalizowano szeregując urządzenia ze względu na częstość użycia a ocenę dostępnych miejsc oparto na znanych wynikach badań Fitts'a nad precyzją ruchów ślepych. Kolejno umieszczano najczęściej używane elementy w dostępnych strefach o największej precyzji ruchów ślepych (zmysłu kinestetycznego).

Zadania rozmieszczenia elementów stanowiska pracy oparte o kryteria 1 rzędu otwarte w zasadzie rozwiązuje się tak jak zadania zamknięte tego samego typu. To znaczy podstawą oceny miejsc są zawsze cechy psychofizyczne człowieka. Jeśli dostępne miejsca nie są fizycznie wyznaczone to projektant ma większą swobodę ale pewne strefy o określonych 'cennościach' mogą i tak być wyznaczane obiektywnymi własnościami organizmu człowieka, a opisany sposób postępowania daje optymalne (formalnie) rozwiązania.

Znacznie bardziej złożona sytuacja dotyczy zadań opisywanych kryteriami drugiego rzędu. Klasyczne podejścia optymalizacyjne pozwalają poszukiwać rozwiązań tylko dla zadań ograniczonych (o określonych precyzyjnie miejscach). Zadanie tego typu jest ostatecznie najczęściej formułowane jako: rozmieścić N urządzeń w M dostępnych miejscach ($M \geq N$) tak aby wartość funkcji typu (2) była minimalna (lub średnia prawda liczona wg wzorca 4 była maksymalna). Optymalne rozwiązania można osiągnąć metodą przeglądania wszystkich możliwych rozmieszczeń oraz metodą podziału i ograniczeń zaproponowaną przez Gavetta i Plytera (1966). Efektywność takiego postępowania pozwala rozwiązywać zadania do rozmiaru kilkunastu elementów. Dlatego przy zadaniach większych konieczne jest używanie algorytmów heurystycznych. Ponieważ klasyczne algorytmy wymagają precyzyjnego określenia miejsc potencjalnej lokalizacji zadania rozmieszczania otwarte muszą być odpowiednio przetransponowane na zadania ograniczone. Najczęściej dokonuje się tego poprzez wprowadzenie siatek modułowych ograniczających dostępną przestrzeń do węzłów lub oczek siatki. Sears (1993) zaproponował takie podejście do optymalizacji okien dialogowych interfejsu komputerowego. Podstawą do budowy kryterium optymalizacji była droga kursora jaką trzeba było pokonać w podstawowych zadaniach realizowanych przez dane okno dialogu. Znajdując optymalne rozwiązania metodą podziału i ograniczeń autor wykazał w badaniach empirycznych że rozwiązania optymalne uzyskane tą metodą rzeczywiście poprawiają efektywność pracy w oknie dialogowym.

Drezner (1988) jako pierwszy zaproponował metodykę realizacji zadań rozmieszczenia otwartych drugiego rzędu na płaszczyźnie bez żadnych ograniczeń w formie tzw szkiców rozproszonych (

scattered plots). Sprawny algorytm heurystyczny opiera się na własnościach wektorów własnych i wartości własnych macierzy (eigen vectors, eigen values). Autor pokazał, że jeśli przyjąć jako kryterium typu (2) formułę:

$$Q2' = \sum c_{ij}d_{ij}^2 / \sum d_{ij}^2 \quad (7)$$

w której c – odpowiada częstości interakcji (L ze wzoru (2)) d odległość odpowiedniej pary obiektów.

Minimalizacja (7) jest możliwa do uzyskania metodą analityczną, ale obiekty muszą być umieszczone na linii prostej. Współrzędne takiego rozwiązania (dla x i y te same) to kolejne elementy wektora własnego związanego z drugą najmniejszą wartością własną macierzy S , w której $s_{ij} = -c_{ij}$ dla $i \neq j$ oraz $s_{ii} = \sum_j c_{ij}$ dla wszystkich i . Dobre rozwiązanie na płaszczyźnie uzyskać można biorąc jako współrzędne y elementy wektora własnego związanego z trzecią najmniejszą wartością własną macierzy S . Są to bowiem współrzędne najlepszego rozwiązania na linii ortogonalnego względem wektora współrzędnych x . Wprawdzie teoria wektorów własnych i wartości własnych macierzy jest dość skomplikowana ale algorytm generujący rozwiązania w myśl tej idei jest bardzo prosty i można go wykorzystać bez znajomości tych skomplikowanych pojęć. Mając dane powiązania c_{ij} wystarczy:

- a) skonstruować macierz S
- b) Obliczyć wartości własne i wektory własne
- c) wybrać dwa wektory związane z drugą i trzecią najmniejszą wartością własną traktując je odpowiednio jako zestawy kolejnych współrzędnych odpowiednio x i y rozwiązania na płaszczyźnie.

Punkt b) musi być oczywiście zrealizowany w odpowiednim programie komputerowym – ale większość programów wspomagających obliczenia matematyczne zawiera odpowiednie procedury (np. Mathematica™).

Na rys. 2 pokazano przykładowy wykres rozproszony dla przykładu w którym wielkości c zestawiono w formie 0-1 to znaczy elementy są powiązane lub nie w następujący sposób:

Na pierwszym miejscu podano numer urządzenia a na kolejnych numery urządzeń powiązanych z tym pierwszym.

```

1 2 8 9 13 20
2 4 5 9 10 12
3 4 8 9 15 16
4 6 9 10
5 6 7
6 7 19 20
7 19
8 9 13 14 15
10 15 17
11 16 20
12 13 15 17
13 14 18 20
14 15 17 18
15 20
19 20

```

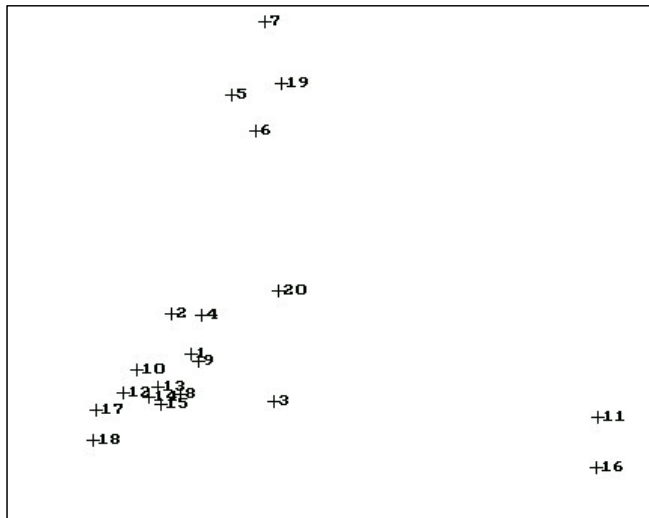


Fig.2. Scatter plot for a data given above.

Łatwo zauważyć, że w większości odpowiadające elementom powiązanim gwiazdki są rozmieszczone blisko siebie w schemacie rozproszonym. Elastyczną metodę komputerowego generowania szkiców rozproszonych o zróżnicowanych parametrach zaproponowano w pracy Grobelnego(1999).

Schemat rozproszony jest bardzo uniwersalną formą wspomagania projektowania rozmieszczenia. Zwłaszcza jeśli będzie traktowany jako swoista ‘podpowiedź’ służąca projektantowi ale nie zastępująca jego wiedzy umiejętności i intuicji.

Najbardziej złożone problemy rozmieszczania dotyczą sytuacji użycia obu typów kryteriów jednocześnie – czyli oceny rozwiązań zadań złożonych. Klasycznym algorytmem stworzonym dla tego typu sytuacji w inżynierii przemysłowej (industrial engineering) jest algorytm Hilliera i Connorsa (1966). Algorytm jest jednak przeznaczony tylko dla zadań ograniczonych (ilość miejsc lokalizacji musi być równa ilości rozmieszczanych urządzeń). Kryterium typu (1) interpretowali autorzy jako ocenę kosztu instalacji maszyn w danych miejscach. Kryterium typu (2) było metryką kosztów transportu w trakcie funkcjonowania układu. Algorytm działa w kierunku minimalizacji sumy obu kryteriów. Wykorzystanie do celów projektowania ergonomicznego wymaga sprowadzenia zadania do ograniczonego oraz wyznaczenia macierzy ‘kosztów instalacji’ poprzez wyznaczenie wartości funkcji (1) dla każdego elementu w każdym miejscu. Trzeba pamiętać także że skale ocen muszą być odpowiednio zdefiniowane – ponieważ algorytm poszukuje kompromisu minimalizującego sumę wartości kryteriów (1) i (2).

Jak dotąd nie przedstawiono w literaturze algorytmów rozwiązujących zadanie złożone otwarte w podobny sposób jak podejście Dreznera rozwiązuje zadanie otwarte drugiego rzędu.

Osobnym problemem występującym w praktyce projektowania ergonomicznego jest kształt i wielkość obiektów które mają tworzyć stanowisko pracy. Dyskutowana, z konieczności uproszczona klasyfikacja nie ujmuje tego zagadnienia, bowiem klasyczne podejścia algorytmiczne omówione tutaj są w znacznym stopniu niezależne od geometrycznych własności obiektów. Jednak wprowadzanie siatek modułowych nasunęło pomysł definiowania wymiarów i przybliżonych kształtów za pomocą modułów siatki. Pierwsze takie podejścia zastosowano w inżynierii przemysłowej już w latach 60-tych. Przykładem metody tego typu jest CORELAP (....). Scharakteryzowany wcześniej algorytm Searsa (1993) wykorzystuje moduły do podziału miejsc w oknie dialogu ale także do symulowania zarysów funkcjonalnych obiektów rozmieszczanych w projektowanych oknach.

Dyskusja i podsumowanie

Rozmieszczanie elementów jest ważnym procesem projektowania złożonych struktur. Ergonomiczne rozmieszczenie powinno być oparte na optymalizacji kryteriów ergonomicznych.

W tym celu trzeba sformułować mniej lub bardziej precyzyjnie mierzalne funkcje – kryteria adekwatne do danej sytuacji. Owe funkcje muszą pozwolić odróżnić lepsze projekty od gorszych. Algorytmy i metody optymalizacyjne w wielu wypadkach pozwalają znaleźć rozwiązania najlepsze lub bardzo dobre.

W tym miejscu powstaje pytanie na ile takie, teoretycznie poprawne ergonomicznie rozwiązania sprawdzają się w praktyce. To znaczy czy znalezione przy użyciu diskutowanych metod rozwiązania poprawiają funkcjonowanie rzeczywistych systemów człowiek – maszyna? Niektóre sytuacje są oczywiste i nie wymagają dodatkowych dowodów czy weryfikacji. Do takich należą problemy o wymiernych fizycznie lub/i ekonomicznie funkcjach (obu rzędów). Podany na początku przykład uzmysławia jednoznacznie że ruch w urzędzie zaprojektowanym wg rozmieszczenia b) będzie mniejszy niż przy rozmieszczeniu a).

Wiele problemów ergonomicznych nie ma jednak tak jednoznacznie wymiernych wskaźników albo te wskaźniki nie są jedynymi wyznacznikami poprawności projektu. Do tego typu problemów należy niewątpliwie sfera interakcji człowiek-komputer. Poprawnie zaprojektowane okno dialogowe czy struktura menu niekoniecznie musi wpłynąć na dobrą jakość interfejsu – bo czynniki wpływające na subiektywne i obiektywne oceny oprogramowania są skomplikowane i nie do końca zidentyfikowane. Eksperymenty laboratoryjne Searsa (1993) a także Grobelnego (1998) wskazują jednak że zoptymalizowane (ze względu na drogę kursora w procesie obsługi) okna dialogowe są obsługiwane sprawniej i/lub oceniane subiektywnie lepiej niż okna zaprojektowane bez formalnej analizy rozmieszczenia obiektów.

Literatura

Bonney M.C., Williams R.W., 1977, A computer program to layout controls and panels, *Ergonomics*, 20, 297-316.

McCormick E.J., 1976, *Human factors in engineering and design*, Mc Graw Hill, Inc.
Fitts P.M., 1947, *Psychological research on equipment design*, Army Air Forces Aviation Psychology Program Research Reports, REPORT 19.

Drezner Z., 1988, A Heuristic Procedure for the Layout of a Large Number of Facilities, *Management Sci.*, 33, 907-915.

Gavett J.W., Plyter N.V., 1966, The optimal assignment of facilities to locations by branch and bound, *Oper. Res.*, 14, 210-232.

Grobelny J., 1988, The "linguistic pattern" method for a workstation layout analysis, *Int.J.of Prod.Res.* 26, 11 /1779-1798/.

Grobelny J., 1998., Index of difficulty (ID) as a quality factor for a graphical man-machine interfaces. In: Manufacturing agility and hybrid automation-II. Proceedings of the Sixth International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing: Agility & Hybrid Automation. Ed. by Waldemar Karwowski and Ravindra Goonetilleke. Santa Monica, CA: IEA Press

Grobelny, J., 1999, Some remarks on scatter plots generation procedures for facility layout. *Int. J. Prod. Res.* , 37,1119-1136.

Grobelny J., Karwowski W., Zurada J., 1995, Applications of fuzzy-based linguistic patterns for the assessment of computer screen design quality, *International Journal of Human-Computer Interaction* 7(3) 193-212.

Hillier F.S., Connors M.M., 1966, Quadratic assignment problem algorithm and the location of indivisible facilities, *Management Sci.*, 13, 42-57.

Karwowski W., Lee W., Grobelny J.,1999, Applications fuzzy system methodologies in human factors and ergonomics, submitted for publication in Zimmermann H. (ed.) *Handbook of Fuzzy Sets and Systems*.

Lee, R.C. and Moore, J.M., 1967, CORELAP-computerized relationship layout planning. *Journal of Industrial Engineering*,18,195-200.

Proctor R.W., Van Zandt T., 1994, *Human Factors in Simple and Complex Systems*, Allyn and Bacon.

Sears A., 1993, Layout appropriateness: A metric for evaluating user interface widget layout, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 19, 707-719.

Wierwille W.W.,1980, *Statistical techniques for instrument panel arrangement*, Virginia Polytechnic Inst. and State University.